



**TUGAS AKHIR - TF 141581**

**PERANCANGAN SISTEM *ACTIVE FAULT  
TOLERANT CONTROL* PADA *REGENERATIVE  
ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK  
DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR**

SENKO DIARNISE  
NRP. 02311440000016

Dosen Pembimbing :  
Ir. Ya'umar, M.T.  
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 141581**

**DESIGN ACTIVE FAULT TOLERANT  
CONTROL SYSTEM FOR REGENERATIVE  
ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM OF ELECTRIC  
VEHICLE WITH FAULT AT ACTUATOR**

**SENKO DIARNISE**  
**NRP. 02311440000016**

**Supervisors :**  
**Ir. Ya'umar, M.T.**  
**Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.**

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2018**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Senko Diarnise  
NRP : 02311440000016  
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Perancangan Sistem *Active Fault Tolerant Control* pada *Regenerative Anti-Lock Braking System* Mobil Listrik dengan Kesalahan pada Aktuator” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 23 Juli 2018  
Yang membuat pernyataan,



Senko Diarnise  
NRP. 02311440000016

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN SISTEM *ACTIVE FAULT TOLERANT  
CONTROL* PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK  
BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN  
KESALAHAN PADA AKTUATOR**

Oleh :  
Senko Diarnise  
NRP. 02311440000016

Surabaya, 23 Juli 2018

**Menyetujui,  
Pembimbing I**

  
Ir. Ya'umar, M.T.  
NIP. 19540406 198103 1 003

**Menyetujui,  
Pembimbing II**

  
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.  
NIP. 19600919 198902 1 001

  
**Mengetahui**  
**Kepala Departemen**  
**Teknik Fisika FTI-ITS**  
  
Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.  
NIP. 19780902 200312 1 002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LEMBAR PENGESAHAN

### **PERANCANGAN SISTEM *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR**

#### **TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi  
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**SENKO DIARNISE**  
**NRP. 02311440000016**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Ya'umar, M.T. .... (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T. .... (Pembimbing II)
3. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. .... (Ketua Penguji)
4. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. .... (Penguji I)
5. Dr.rer.nat. Ir. Aulia M.T. Nasution, M.Sc. .... (Penguji II)

**SURABAYA**  
**JULI, 2018**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**PERANCANGAN SISTEM *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR**

**Nama** : Senko Diarnise  
**NRP** : 02311440000016  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Yau'mar, M.T.  
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

**Abstrak**

Faktor keamanan (*safety*) merupakan peran yang sangat penting untuk sistem pengereman pada mobil listrik, dengan berkembangnya teknologi diciptakan *Regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS). Sistem kontrol yang bekerja pada aktuator *regenerative* ABS harus memiliki performansi dan kehandalan yang tinggi. Adanya kegagalan pada aktuator *regenerative* ABS dapat menurunkan tingkat keamanan pada mobil listrik. Metode yang dapat menoleransi kegagalan pada suatu sistem salah satunya adalah *Active Fault Tolerant Control* (AFTC). Kegagalan yang dikompensasi berupa kegagalan pada aktuator hidraulik. Perancangan sistem dengan AFTC dan *Sliding Mode Controller* (SMC) sebagai pengendali sistem pada *regenerative* ABS mampu mengkompensasi kesalahan bias sebesar 9%, 12%, 16% dan *loss of effectiveness* sebesar 6% dengan parameter performansi dari *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state* berturut-turut sebesar 18,3%; 0,081s; dan 0,9%. Pada kesalahan *loss of effectiveness* sebesar 6%, respon *slip ratio* menjadi 0 tanpa AFTC didetik ke-0,87; sedangkan adanya AFTC menunjukkan *slip ratio* tetap stabil didetik ke-0,87 hingga kendaraan berhenti.

**Kata Kunci:** *Regenerative Anti-Lock Braking System, Active Fault Tolerant Control, Sliding Mode Controller, Aktuator Hidraulik*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**DESIGN ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM  
FOR REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM OF  
ELECTRIC VEHICLE WITH FAULT AT ACTUATOR**

**Name** : Senko Diarnise  
**NRP** : 02311440000016  
**Department** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Supervisors** : Ir. Yau'mar, M.T.  
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

**Abstract**

Safety is very important for the braking system in electric cars, with the development of technology, is created Regenerative Anti-Lock Braking System (ABS). Control system that works on regenerative ABS actuators requires high performance and reliability. The failures on regenerative ABS actuators can change the safety level of electric cars. One of the methods that can tolerate the failures is Active Fault Tolerant Control (AFTC). Failures on the hydraulic actuator will be compensated. Design of AFTC and The application of Sliding Mode Controller (SMC) as controller of regenerative ABS is able to compensate bias error of 9%, 12%, 16% and loss of effectiveness is 6% with control performances result shown by Maximum Overshoot is 18,3%; Settling Time is 0,081s; and Steady State Error is 0,9%. Loss of effectiveness at 6%, the response of the slip ratio becomes 0 without AFTC at 0.87 seconds, while the AFTC indicates slip ratio is stable at 0.87 seconds until the vehicle stops.

**Keywords** : Regenerative Anti-Lock Braking System (ABS), Active Fault Tolerant Control (AFTC), Sliding Mode Controller (SMC), Hydraulic Actuator

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul

### **PERANCANGAN SISTEM *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Ir. Ya'umar, M.T. dan Bapak Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T. selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati selaku dosen pembimbing pada penelitian laboratorium dana lokal ITS tahun 2018 yang dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Ibu Dr. Katherin Indriawati selaku Kepala Laboratorium Fisika Rekayasa Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
5. Bapak Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku ketua bidang minat Rekayasa Instrumentasi Teknik Fisika ITS telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
6. Bapak Ir. Zulkifili, M.Sc selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.

7. Kedua orang tua (Bapak Joko Setyono Kuswara dan Ibu Sri Mulyantini). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
8. Seluruh teman Tugas Akhir Rifqi, Hija, Naufal, Hito, Roni, Sarwenda, Anis, Faris, terima kasih untuk semuanya.
9. Seluruh teman – teman Departemen Teknik Fisika ITS angkatan 2014, terima kasih untuk semuanya.
10. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika ITS, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
11. Teman - teman seperjuangan di Surabaya, Aldy, Aji, Palep, Ndas Bocor Familia, Rhama, Arief, Mas Arizal, Anto, Mba Manda, Manda yang telah menemani penulis bermain selama menempuh pendidikan di ITS.
12. Teman – teman CUMI FAMILY, Rio, Rido, Vhira, Mia, Upi, Aul, Ayi, Ami, Cici, Cepe, Yoga, yang telah mendukung dan memberi motivasi kepada penulis.
13. Teman – teman kosan Ibu Aminah: Irfan, Mas Mirza, Mas Nupi, Uta, Dimas, Mas Andi, terimakasih untuk semuanya.
14. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 25 Juli 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul.....	i
<i>Title Page</i> .....	iii
Pernyataan Bebas Plagiarisme.....	v
Lembar Pengesahan I .....	vii
Lembar Pengesahan II .....	ix
Abstrak.....	xi
Abstract .....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xxi
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TEORI PENUNJANG.....	7
2.1 Mobil Listrik .....	7
2.2 <i>Anti-Lock Braking System (ABS)</i> .....	10
2.3 <i>Sliding Mode Control (SMC)</i> .....	20
2.5 <i>Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC)</i> .....	23
2.6 <i>Observer State</i> .....	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	31
3.1 Pemodelan <i>Quarter Car Model (QCM)</i> .....	34
3.2 Pembuatan Sistem Kontrol <i>Sliding Mode Controller</i> (SMC) .....	40
3.3 Pembuatan <i>Observer</i> .....	43
3.4 Perancangan Sistem <i>Active Fault Tolerant Control</i> (AFTC) untuk Kesalahan Aktuator .....	47
3.5 Pengujian Sistem <i>Active Fault Tolerant Control</i> (AFTC) untuk Kesalahan Aktuator .....	48
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	49
4.1 Uji Validasi Pemodelan <i>Quarter Car Model (QCM)</i> ...	49

4.2	Uji <i>Close Loop</i> Menggunakan <i>Sliding Mode Controller</i> .....	50
4.3	Respon Kecepatan Kendaraan dan Roda .....	52
4.4	Hasil dari Estimasi <i>Observer</i> .....	53
4.5	Uji Kesalahan Aktuator.....	55
4.6	Respon <i>State of Charge</i> pada Baterai .....	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		61
5.1	Kesimpulan .....	61
5.2	Saran .....	61
DAFTAR PUSTAKA.....		63
LAMPIRAN .....		67
BIODATA PENULIS.....		81

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Wood's phaeton .....	7
<b>Gambar 2.2</b> Sebring-Vanguard city car.....	8
<b>Gambar 2.3</b> Geo metro .....	9
<b>Gambar 2.4</b> Mobil listrik generasi sekarang .....	9
<b>Gambar 2.5</b> Perbandingan koefisien gesek pada permukaan jalan tertentu dengan slip rasio roda.....	11
<b>Gambar 2.6</b> Perbedaan kendaraan mobil yang menggunakan ABS dan tanpa ABS .....	13
<b>Gambar 2.7</b> Komponen ABS dengan rem hidraulik.....	14
<b>Gambar 2.8</b> ABS <i>modulator valve</i> .....	16
<b>Gambar 2.9</b> Kurva torsi-kecepatan dan pemetaan efisiensi dari motor.....	18
<b>Gambar 2.10</b> Diagram alir pada sistem pengereman <i>regenerative</i> di mobil listrik .....	19
<b>Gambar 2.11</b> Interpretasi grafik SMC.....	20
<b>Gambar 2.12</b> Struktur umum AFTC .....	24
<b>Gambar 2.13</b> Skema <i>reconfigurable controller</i> .....	25
<b>Gambar 2.14</b> Diagram blok dari sistem dan <i>observer state</i> .....	27
<b>Gambar 2.15</b> <i>Extended State Observer</i> .....	29
 <b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian.....	 33
<b>Gambar 3.2</b> Diagram blok <i>regenerative anti-lock braking system</i> .....	34
<b>Gambar 3.3</b> Dinamika gaya yang bekerja pada kendaraan untuk <i>quarter car model</i> .....	35
<b>Gambar 3.4</b> Skema ABS <i>hydraulic brake system</i> .....	38
<b>Gambar 3.5</b> Dinamika yang bekerja pada <i>quarter car model</i> untuk <i>regenerative ABS</i> .....	40
<b>Gambar 3.6</b> Skema diagram blok perancangan <i>sliding mode controller</i> .....	43
<b>Gambar 3.7</b> Diagram blok perancangan AFTC pada <i>regenerative anti-lock braking system</i> .....	47
 <b>Gambar 4.1</b> Respon dari uji <i>open loop</i> pada simulasi .....	 49

<b>Gambar 4.2</b> Respon <i>slip ratio</i> pada sistem <i>close loop</i> dengan pengendalian <i>sliding mode controller</i> .....	50
<b>Gambar 4.3</b> Respon <i>slip ratio</i> pada sistem <i>close loop</i> ABS dengan <i>Auto Tuning</i> PID .....	51
<b>Gambar 4.4</b> Respon kecepatan kendaraan dan roda tanpa ABS	52
<b>Gambar 4.5</b> Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS .....	52
<b>Gambar 4.6</b> Hasil estimasi <i>observer</i> tanpa kesalahan .....	53
<b>Gambar 4.7</b> Hasil estimasi <i>observer</i> dengan kesalahan bias 9% .....	54
<b>Gambar 4.8</b> Grafik respon dari hasil uji kesalahan bias 9% .....	56
<b>Gambar 4.9</b> Grafik respon dari hasil uji kesalahan bias 12% ....	57
<b>Gambar 4.10</b> Grafik respon dari hasil uji kesalahan bias 16% ..	58
<b>Gambar 4.11</b> Grafik respon dari hasil uji kesalahan <i>loss of effectiveness</i> 6% .....	59
<b>Gambar 4.12</b> Grafik respon dari <i>state of charge</i> pada baterai ...	60

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b> Parameter koefisien gesekan pada permukaan <i>dry asphalt</i> (aspal kering) .....	36
<b>Tabel 3.2</b> Parameter pemodelan kendaraan pada gaya pengereman .....	37
<b>Tabel 3.3</b> Parameter simulasi pada motor .....	39
<b>Tabel 4.1</b> Parameter performansi sistem pengendalian untuk uji <i>close loop</i> .....	50
<b>Tabel 4.2</b> Parameter performansi kesalahan bias 9 % .....	56
<b>Tabel 4.3</b> Parameter perfomansi kesalahan bias 12% .....	57
<b>Tabel 4.4</b> Parameter perfomansi kesalahan bias 16% .....	58
<b>Tabel 4.5</b> Parameter perfomansi kesalahan <i>loss of effectiveness</i> 6% .....	59

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Modern ini kendaraan bermotor sudah menjadi sarana transportasi populer di negara-negara berkembang seperti negara-negara Asia lainnya terutama Asia Tenggara, tidak terkecuali di Indonesia. Di Indonesia, kendaraan bermotor menjadi sarana transportasi wajib untuk dimiliki dengan awalnya berorientasi pada kebutuhan sekunder untuk memiliki kendaraan bermotor, melainkan menjadi kebutuhan yang harus dipenuhi untuk memudahkan dalam beraktivitas setiap harinya, dan menyebabkan keinginan masyarakat untuk memiliki kendaraan bermotor semakin meningkat pula. Aturan pemerintah tentang *Low Cost Green Car* (LCGC) semakin meningkatkan antusiasme masyarakat untuk membeli kendaraan bermotor terutama roda empat. Namun demikian, meskipun kendaraan bermotor memiliki berbagai kelebihan seperti memudahkan manusia dalam hal mobilitas, melainkan banyak memberikan dampak negatif pada lingkungan seperti polusi udara dan pemanasan global sebagai akibat gas buang kendaraan berbahan bakar minyak bumi untuk kendaraan konvensional, serta dapat mengurangi cadangan minyak bumi akibat dari peningkatan jumlah kendaraan bermotor (kendaraan konvensional). Teknologi pada industri otomotif semakin berkembang dan diciptakanlah teknologi kendaraan listrik atau *electric vehicle* (EV), sebagai solusi untuk mengurangi dampak negatif dari kendaraan konvensional. Teknologi untuk sistem pada EV sama dengan kendaraan konvensional, seperti sistem pengereman, monitoring, maupun pengendalian.

Faktor keamanan (*safety*) merupakan peran yang sangat penting untuk sistem pengereman pada EV maupun kendaraan konvensional. Seiring berkembangnya teknologi otomotif, diciptakan teknologi untuk sistem pengereman yang saat ini umum dipakai oleh kendaraan berpenumpang adalah *Anti-Lock Braking System* (ABS). ABS merupakan sistem pengereman yang berfungsi untuk mencegah roda pada mobil terkunci ketika adanya

pengereman darurat atau pengereman secara mendadak (Chen & Wang, 1996). ABS digunakan pada mobil untuk mencegah terjadinya slip dan penguncian pada roda saat pengereman darurat atau pengereman secara mendadak. Pada saat terjadi pengereman mendadak atau darurat, mobil yang dilengkapi dengan ABS tetap stabil dikarenakan jarak penghentian mobil menjadi berkurang dan meningkatkan pengendalian kemudi kendaraan (Stanislaw & Yonggon, 2002). Sistem ABS pada EV selain terdiri atas sistem pengereman dengan menggunakan komponen hidrolik, juga dapat dilengkapi dengan sistem pengereman *regenerative* (Tur, et al., 2007). Sistem pengereman ini akan mengubah energi kinetik ketika terjadi perlambatan pada mobil menjadi energi listrik yang akan disimpan pada penyimpanan energi dan dapat digunakan kembali (Yanan, 2016). Sehingga, pengereman *regenerative* dapat meningkatkan efisiensi kendaraan dan teknologi ini telah diterapkan pada berbagai jenis EV.

ABS pada umumnya terdiri dari beberapa komponen seperti *wheel speed sensor*, *electronic controller unit* (ECU), unit modulator, dan beberapa komponen pengereman. Unit modulator atau aktuator pada pengereman *regenerative* ABS kendaraan listrik menggunakan motor *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) dan juga *hydraulic valve* sebagai pengereman untuk hidroliknya. PMSM adalah jenis motor yang banyak digunakan dalam aplikasi di industri selain motor induksi. Beberapa keuntungan dari *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) yaitu memiliki efisiensi yang tinggi serta memiliki daya listrik yang tinggi (Yi, et al., 2017). Salah satu aplikasi dari *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) pada dunia industri yaitu penggunaan *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) sebagai penggerak roda kendaraan listrik. Saat ini, ABS menjadi bagian sistem yang penting pada kendaraan bermotor dari isu faktor keamanan. Kegagalan yang terjadi secara tiba-tiba pada sistem mengakibatkan peluang terjadinya kecelakaan meningkat pula. Sehingga, untuk hal tersebut yang dapat mencegah kecelakaan adalah diperlukan teknologi yang menoleransi kesalahan dan meningkatkan performansi, serta efisiensi pada



sistem ABS. Teknologi sistem kontrol yang dapat menoleransi gangguan berupa kesalahan pada komponen secara otomatis disebut *Fault Tolerant Control System* (FTCS). FTCS dapat diklasifikasikan menjadi 2 jenis yaitu *Active Fault Tolerant Control System* (AFTCS) dan *Passive Fault Tolerant Control System* (PFTCS). AFTCS terdiri dari 2 tahapan yaitu *Fault Detection and Identification* (FDI) dan *Reconfigurable Control* (Noura, et al., 2009). FDI digunakan untuk memperkirakan kesalahan sedangkan *Reconfigurable Control* digunakan untuk mengkompensasi sinyal kendali secara otomatis, sehingga sistem tetap stabil.

Penelitian sebelumnya dilakukan perancangan AFTC pada ABS mobil listrik yang menjelaskan tentang sistem pengereman ABS dengan mengestimasi dan menoleransi gangguan kesalahan pada aktuator (Arigi, 2018). Aktuator yang dikendalikan pada penelitian tersebut hanya di unit modulator dari ABS, sehingga tidak dapat dijadikan *regenerative anti-lock braking system* dikarenakan tidak menggunakan PMSM. Oleh karena itu, dibuatlah tugas akhir mengenai desain AFTC pada *regenerative anti-lock braking system* untuk EV agar dapat meningkatkan faktor keamanan (*safety*) yang ada pada mobil listrik.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan permasalahan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana merancang *observer* untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi diaktuator hidraulik pada *regenerative ABS*?
- Bagaimana merancang *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk mengatasi kesalahan diaktuator hidraulik pada *regenerative ABS*?

## 1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan pada tugas akhir ini adalah sebagai penyempurnaan sistem kontrol

*regenerative* ABS untuk mengatasi kesalahan pada aktuator menggunakan metode AFTC.

#### 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Kendaraan yang ditinjau pemodelannya adalah berupa *quarter car model* untuk jenis kendaraan berpenumpang.
- Sistem kontrol yang digunakan adalah *sliding mode control*.
- Kendaraan diasumsikan dengan kondisi pengereman sampai berhenti dan berada pada lintasan lurus dikondisi jalan aspal kering, datar, dan tidak bergelombang.
- Nilai *setpoint* 0,2 berdasarkan dari *slip ratio* yang optimal di berbagai kondisi jalan.
- *Slip ratio* merupakan variabel yang dikendalikan.
- Torsi pengereman merupakan variabel yang dimanipulasi.
- Kecepatan roda dan kecepatan mobil merupakan variabel yang diukur.
- Kesalahan berupa bias dan *loss of effectiveness* pada aktuator hidraulik dengan nilai kesalahan bias sebesar 9%, 12%, 16% dan nilai kesalahan *loss of effectiveness* sebesar 6%.

#### 1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN**  
Bab I berisi mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika laporan dari tugas akhir ini.
- **BAB II DASAR TEORI**  
Bab II penjelasan mengenai teori yang dapat menunjang dalam tugas akhir ini, seperti perkembangan mobil listrik, pengertian dari *anti-lock braking system* (ABS), algoritma *regenerative braking*, *sliding mode control*, sistem *active fault tolerant control* (AFTC), dan *observer*.

- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode dan langkah-langkah dalam penelitian.

- **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab IV ini berisi tentang perbandingan sistem ABS dengan sistem kendali konvensional dan ABS dengan menggunakan pengendali *active fault tolerant control* untuk kesalahan pada aktuator hidrolik.

- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB II**

### **TEORI PENUNJANG**

#### **2.1 Mobil Listrik**

Mobil listrik adalah kendaraan yang pada dasarnya digerakkan dengan menggunakan energi listrik. Dibandingkan dengan mobil konvensional biasa, mobil listrik memiliki banyak kelebihan yaitu seperti tidak adanya emisi, efisiensi yang tinggi, serta sistem operasi yang tenang dan lancar. Pada awalnya perkembangan mobil listrik dimulai sejak 100 tahun yang lalu, dengan Inggris dan Perancis merupakan negara pertama yang mengembangkan mobil listrik. Perkembangan mobil listrik terbagi dalam 4 generasi, yaitu generasi pertama (1890 - 1920), generasi menengah (1930 - 1990), generasi modern (1990- 2010), dan generasi sekarang (2011 - sekarang) (Smart, 2016).

Mobil listrik generasi pertama yang ditemukan di tahun 1902 bernama *Wood's Phaeton* dengan jarak tempuh sebesar 18 mil dan kecepatannya 14 mil/jam, serta menghabiskan biaya sekitar \$2000. Bentuk dari *Wood's Phaeton* ditunjukkan pada **Gambar 2.1**. Pada tahun 1900an mobil listrik sangat populer di kalangan masyarakat serta memiliki banyak keunggulan dibandingkan mobil konvensional.



**Gambar 2.1** Wood's phaeton (Smart, 2016)

Pada tahun 1935 hingga tahun 1960, perkembangan mobil listrik sempat terhambat. Kendaraan konvensional memiliki emisi gas buang yang berbahaya tersebut mulai disadari masyarakat. Pada tahun 1960 – 1970, banyak negara mulai tertarik dengan mobil listrik karena dapat mengurangi emisi gas buang mesin serta mengurangi impor bahan bakar minyak bumi. Bentuk dari mobil listrik generasi menengah mengikuti bentuk mobil konvensional saat itu meskipun tidak persis sama, seperti yang ditunjukkan **Gambar 2.2**.



**Gambar 2.2** Sebring-Vanguard city car (Smart, 2016)

Mobil listrik generasi modern memiliki berbagai macam spesifikasi dan beberapa model. Pick up Chevrolet S-10 yang diproduksi oleh U.S Electric Car mampu menempuh jarak 60 mil dengan menggunakan dua daya, yaitu dari alternatif motor dan baterai asam timbal, sehingga hanya menghabiskan waktu 7 jam untuk pengisian baterainya. Geo metro (**Gambar 2.3**) yang diproduksi oleh Solectria Corp adalah mobil sedan empat penumpang bertenaga listrik dari motor arus bolak balik serta baterai asam timbal. Mobil ini dapat menempuh 50 mil dengan lama pengisian baterai 8 jam. Pada tahun 1994, pada ajang American Tour de Sol dari New York ke Philadelphia, diluncurkan mobil listrik yang telah mampu menempuh jarak lebih dari 200 mil dalam sekali pengisian baterai. Baterai yang digunakan adalah baterai hibrida nikel logam ovonic.



**Gambar 2.3** Geo metro (Smart, 2016)

Seiring berkembangnya zaman, mobil listrik menjadi salah satu kendaraan yang dapat memenuhi kebutuhan manusia dengan tetap menjaga lingkungan. Oleh sebab itu pada generasi modern, mobil listrik mampu bersaing dengan mobil konvensional. Mobil listrik terbaru adalah Tesla S P100D. Mobil ini memegang rekor sebagai *The Fastest Accelerating Production Car in The World*. Mobil ini memiliki baterai 100 kWhour dan dapat menempuh jarak sejauh 500 km. Dari segi bentuk, tidak ada perbedaan antara mobil listrik dengan mobil konvensional seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.



**Gambar 2.4** Mobil listrik generasi sekarang (Smart, 2016)

## 2.2 Anti-Lock Braking System (ABS)

*Anti-Lock Braking System* atau ABS digunakan pada mobil untuk mencegah terjadinya slip dan penguncian pada ban saat pengereman. ABS berfungsi ketika terjadi proses pengereman, kendaraan dapat mencapai akselerasi minimum dengan optimal tanpa mempengaruhi stabilitas dan kemampuan kendali kemudi pada kendaraan dengan mengutamakan keselamatan yang maksimal (Harifi, et al., 2005), sehingga komponen ini adalah salah satu sistem keamanan (*safety*) pada mobil. ABS pertama kali diterapkan untuk kereta api ditahun 1943, kemudian diterapkan untuk kendaraan otomotif mobil pada tahun 1971 (Solyom & Rantzer, 2002) dengan tujuan utama mencegah roda terkunci, mengurangi jarak henti (*stopping distance*), meningkatkan stabilitas kendaraan, dan meningkatkan *steerability* ketahanan selama pengereman (Johansen, et al., 2003), (Petersen, et al., 2003), (Solyom & Rantzer, 2002). Pada proses pengereman, terjadi *tractive force* yang dihasilkan oleh ban sebanding dengan gaya normal jalan yang bekerja pada ban. Perbandingan yang digunakan tergantung variasi atau koefisien jalan seperti kering, basah, bersalju, dan lain sebagainya, serta karakteristik lekukan jalan seperti jalanan yang berlubang, rata, dan lain sebagainya. Pada penelitian yang dilakukan (Guo, et al., 2014) terdapat grafik fungsi non-linear antara *breaking effort coefficient* ( $\mu$ ) yaitu gesekan antara ban dan permukaan jalan dengan slip rasio roda ( $\lambda$ ) pada kondisi jalanan tertentu, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.

Pada **Gambar 2.5** menunjukkan bahwa pada kondisi jalan bersalju dan es, gesekan antara ban dan jalan memiliki  $\mu$  (*breaking effort coefficient*) yang sangat rendah dan mengakibatkan resiko slip roda semakin tinggi. Sebaliknya dengan kondisi jalan aspal kering dan beton kering yang dapat dikatakan kondisi jalan normal, gesekan memiliki  $\mu$  yang besar, sehingga resiko roda akan slip menjadi sangat rendah. Nilai  $\mu$  berdasarkan pada (Guo, et al., 2014) diperoleh melalui persamaan:

$$\mu(\lambda, v) = \left[ C_1 (1 - e^{-C_2 \lambda}) - C_3 \lambda \right] e^{-C_4 \lambda v} \quad (2.1)$$



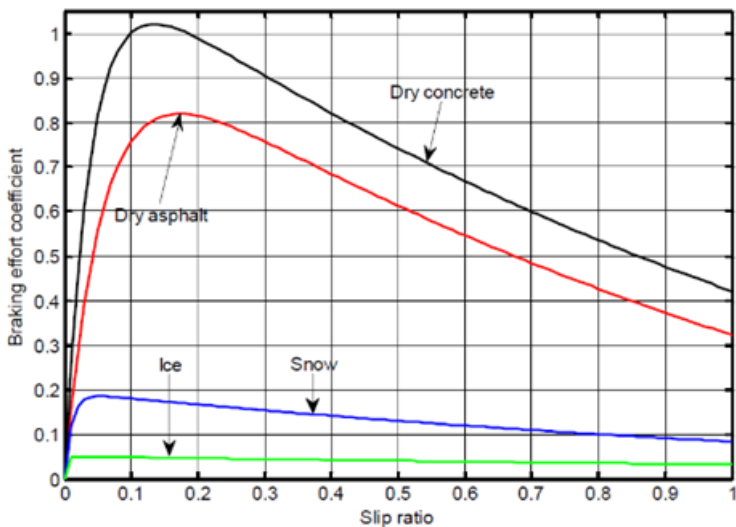
Dimana:

$C_1$  = Nilai maksimum kurva gesekan

$C_2$  = Bentuk kurva gesekan

$C_3$  = Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat  $\lambda = 1$

$C_4$  = Nilai karakteristik kebasahan jalan



**Gambar 2.5** Perbandingan koefisien gesek pada permukaan jalan tertentu dengan slip rasio roda (Guo, et al., 2014)

Pada jurnal penelitian (Aly, et al., 2011) nilai slip rasio roda ( $\lambda$ ) memiliki persamaan yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} \quad (2.2)$$

Dimana:

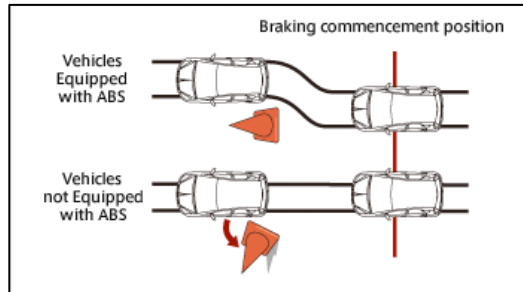
$\omega$  = Kecepatan sudut pada roda (rad/s)  
 $R$  = Jari – jari putaran roda (m)  
 $V$  = Kecepatan kendaraan (m/s)

Saat kondisi normal berkendara,  $V = \omega R$ , slip rasio ( $\lambda$ ) akan bernilai 0. Ketika saat terjadi pengereman yang parah, dapat didefinisikan  $\omega = 0$  ketika  $\lambda = 1$  dan hal tersebut mengakibatkan roda terkunci (*wheel lockup*). Roda terkunci dapat menyebabkan hilangnya kontrol terhadap kemudi kendaraan dan memperpanjang jarak pemberhentian kendaraan yang mana hal tersebut merupakan keadaan yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, ABS akan memanipulasi slip pada roda, sehingga dapat melakukan gesekan maksimum dengan jalan dan mestabilkan kemudi kendaraan.

Berdasarkan tujuan utama adanya ABS didapatkan 3 hal penting dari ABS yaitu jarak henti, kestabilan, dan ketahanan dari kendaraan (Harifi, et al., 2005). Jarak henti dari kendaraan pada proses pengereman menjadi salah satu faktor penting. Parameter yang mempengaruhi jarak henti dari kendaraan adalah massa kendaraan, kecepatan awal kendaraan, dan gaya pengereman. Jarak henti dari kendaraan dapat diperkecil dengan peningkatan gaya pengereman dikarenakan setiap jenis permukaan jalan memiliki koefisien puncak dari gaya pengereman tersebut, sehingga adanya ABS dapat mengontrol kendaraan untuk mencapai gaya gesek maksimum dan menghasilkan jarak pengereman minimum.

Adanya kebutuhan akan stabilitas dan ketahanan dari kendaraan yang dapat mempengaruhi ABS ini menjadikan kestabilan dari kendaraan adalah faktor yang penting untuk posisi kendaraan ketika proses pengereman terjadi. Perbedaan kendaraan mobil yang menggunakan ABS dan tanpa ABS seperti pada **Gambar 2.6** saat terjadi proses pengereman dan permukaan jalan yang licin dibutuhkan gaya gesekan maksimum untuk memperlambat dan menghentikan kendaraan, sehingga dengan kondisi permukaan jalan seperti itu kendaraan mobil yang tidak menggunakan ABS tidak akan mendapatkan gaya gesekan maksimum dikarenakan gaya pengereman lebih besar disatu sisi kendaraan saja, daripada disisi lainnya. Ketika menerapkan rem penuh pada kedua sisi dari kendaraan akan menghasilkan momen mengayuh atau meluncur yang dapat menarik kendaraan ke sisi yang memiliki gaya gesekan tinggi dan mengakibatkan

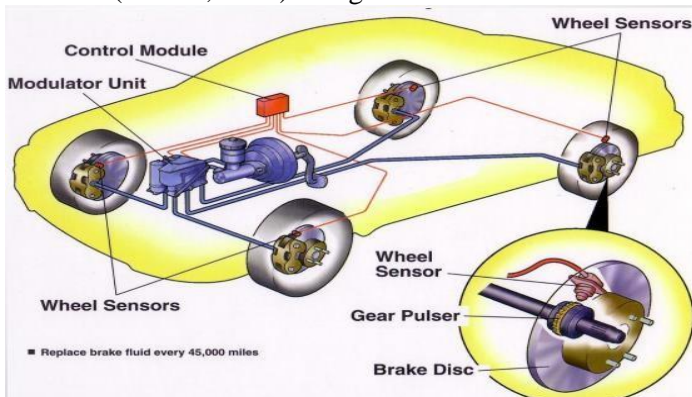
ketidakstabilan kendaraan. Menjaga slip kedua roda belakang maupun depan pada tingkat yang sama dan meminimalkan dua koefisien gesekan puncak adalah konsep dari ABS ini (Harifi, et al., 2005).



**Gambar 2.6** Perbedaan kendaraan mobil yang menggunakan ABS dan tanpa ABS (Motors, 2015)

Kendali terhadap titik puncak gaya gesek yang baik diperlukan untuk mencapai *lateral force* yang baik, sehingga diperlukan ketahanan kendaraan yang mencukupi. Ketahanan kendaraan saat pengereman penting tidak hanya untuk koreksi ringan saja, tetapi untuk kemungkinan ketika pengemudi menghadapi rintangan. Kendaraan yang dilengkapi ABS, kinerja ban sangat penting, karena semua gaya pengereman dan kemudi dihasilkan di dalam ban dari bagian kontak antara kendaraan dan jalan. *Tractive force* pada ban dan juga *lateral force* hanya dapat dihasilkan ketika ada perbedaan antara kecepatan lingkaran ban dan kecepatan relatif kendaraan terhadap permukaan jalan. Perbedaan tersebut dilambangkan sebagai slip. Hal ini biasa terjadi untuk menghubungkan gaya pengereman ban terhadap gaya slip ban. Setelah titik mencapai titik puncak, slip roda yang meningkat menyebabkan reduksi koefisien gesekan ban terhadap jalan. Sehingga, ABS harus membatasi slip ke nilai di bawah nilai titik puncak untuk mencegah terjadinya *lockup* pada roda. Roda dengan titik puncak gesekan yang tinggi mencapai gesekan maksimum pada 0,2 atau 20 % slip (Tur, et al., 2007). Pada ABS terdapat beberapa komponen utama seperti yang ditunjukkan oleh

**Gambar 2.7.** Komponen – komponen ABS akan dijelaskan berdasarkan (Wabco, 1999) sebagai berikut:



**Gambar 2.7** Komponen ABS dengan rem hidraulik (Aly, et al., 2011)

### 2.2.1 Sensor Kecepatan Roda

Sensor kecepatan pada roda merupakan elemen *sensing* kecepatan rotasi ban dari sistem ABS yang tersegel rapat dan biasanya terletak di ujung roda. Kendaraan yang menggunakan ABS pada umumnya memiliki empat sensor dan terletak pada pinggiran roda di tiap sisi as. Mengenai peletakan sensor bergantung pada tipe suspensinya. Secara khusus, sensor pada kendaraan bersuspensi *spring* diletakkan pada as ganda bagian depan, sedangkan pada kendaraan bersuspensi udara (*air suspension*), sensor diletakkan pada bagian belakang. Keluaran dari sensor ini kemudian diteruskan ke *electronic control unit* (ECU) untuk menentukan kapan ABS akan diaktifkan. Adapun dua tipe sensor yang dapat digunakan, antara lain: sensor sudut kanan dan sensor lurus.

### 2.2.2 *Electronic Control Unit* (ECU)

ECU adalah bagian yang bertugas untuk memproses fungsi dari ABS. Secara umum ECU bertugas untuk menerima, menguatkan dan menyaring sinyal yang dikirim oleh sensor untuk

menghitung kecepatan dan akselerasi roda, lalu secara *logic* memutuskan roda ketika hendak mengunci dan mengaktifkan *valve* ABS pada kondisi dan waktu tertentu. Pada saat *valve* aktif, ECU dapat mengatur tekanan udara yang menuju ruangan rem. ECU dengan menggunakan kabel dapat menghubungkan antara komponen-komponen ABS lainnya seperti, *wheel sensor*, *modulator unit*, *power source*, *ground*, dan lain sebagainya.

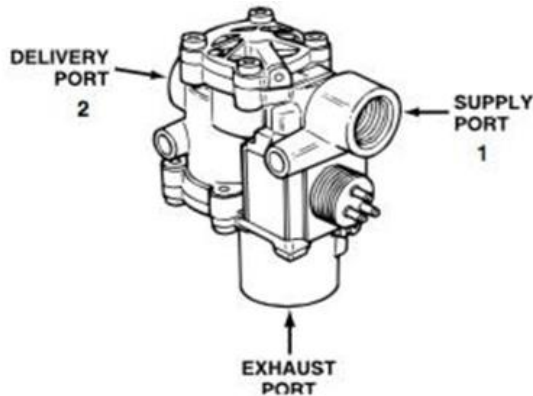
### 2.2.3 Unit Modulator

Unit modulator atau umumnya disebut dengan *hydraulic control unit* merupakan salah satu komponen *safety* pada mobil yang berfungsi untuk mengatur tekanan udara ke masing-masing rem yang dikendalikan oleh ABS. *Hydraulic control unit* tidak diaktifkan ketika pengereman normal dan udara mengalir melalui *valve* (katup) ABS ke bagian ruang rem. Pada saat ABS diaktifkan, *valve* (katup) ABS bekerja untuk mengatur tekanan udara di bagian ruang rem yang berfungsi agar dapat mengendalikan pengereman dan mencegah roda terkunci.

Katup ABS merupakan katup udara yang dikontrol solenoid, terdiri dari dua jenis *solenoid* yang dioperasikan secara elektrik dan dua katup diafragma. ECU akan mengendalikan *solenoid* supaya bertindak sangat cepat dikarenakan *solenoid* berfungsi untuk mengendalikan diafragma yang akan membuka atau menutup agar memberikan dan mengurangi tekanan pada bagian ruang rem. Katup ABS terdiri dari tiga *port* udara, yaitu *supply port* berfungsi untuk menerima tekanan udara dari katup *relay*, *delivery port* berfungsi untuk mengirim tekanan udara ke bagian ruang rem, *exhaust port* berfungsi untuk mengeluarkan tekanan udara hanya dari sisi *delivery-port* pada saat pengendalian ABS; ketiga katup udara tersebut seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.8**.

ABS memiliki skema pengereman yang berbeda tergantung pada jenis penggunaan rem yang berdasarkan pada katup dan jumlah sensor kecepatan. Pertama adalah skema dengan 4 kanal (*four channel*), ditipe ini kendaraan bermotor mempunyai 4 sensor ABS dan katup yang terpisah untuk keempat rodanya. *Controller* dengan skema ini akan memonitor setiap roda secara terpisah untuk

memastikan roda-roda tersebut mencapai gaya pengereman yang maksimal.



**Gambar 2.8** ABS modulator valve (Wabco, 1999)

Skema pengereman ABS yang kedua adalah 3 kanal (*three channel*), tipe ini umumnya dapat ditemukan pada kendaraan jenis truk maupun *pickup* dengan 4 roda yang mana setiap sisi depan roda terdapat sebuah katup dan sebuah sensor, serta satu katup dan satu sensor untuk kedua roda belakang kendaraan. Sensor untuk roda belakang berada pada as belakang. Pada sistem ini menyediakan kontrol individual diroda depan, sedangkan pada roda belakang akan dikontrol secara bersamaan agar dapat mencapai gaya pengereman yang maksimal. Pada sistem ini apabila roda belakang melakukan penguncian selama berhenti, dapat mengurangi efektifitas rem.

Tipe skema pengereman ABS yang ketiga adalah 1 kanal (*one channel*). Truk pickup dan truk berat merupakan tipe kendaraan yang memiliki skema pengereman satu kanal ini. Pada tipe ini terdiri dari 1 katup yang beroperasi pada kedua roda belakang, dan 1 sensor yang berada pada as belakang. Sistem pengereman pada tipe ini hampir sama dengan tipe 3 kanal. Roda belakang dimonitor secara bersamaan dan kedua roda tersebut harus mengunci sebelum ABS memulai beroperasi. Sistem ini juga ada kemungkinan satu dari roda belakang akan mengunci, sehingga

akan mengurangi efektifitas rem. Sistem ini dapat dengan mudah diidentifikasi, karena biasanya sistem ini akan menjadi satu jalur rem melalui sebuah *T-fitting* untuk kedua roda belakangnya.

Roda dengan titik puncak gesekan yang tinggi mencapai gesekan maksimum pada 0,2 atau 20 % slip (Tur, et al., 2007)

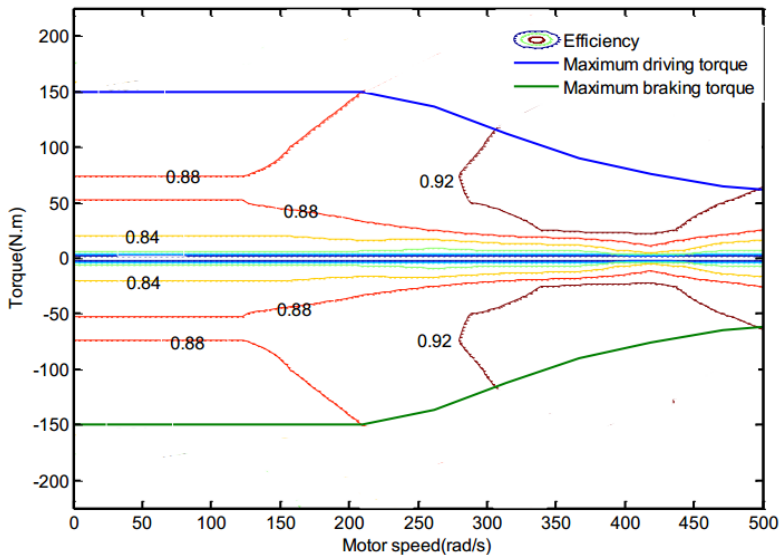
Berdasarkan penelitian (Tur, et al., 2007) roda dengan titik puncak gesekan yang tinggi mencapai gesekan maksimum pada 0,2 atau 20% slip dan dengan penelitian (Guo, et al., 2014) titik puncak gesekan pada roda dapat ditoleransi sampai dengan batas slip 0,15 – 0,25 atau 15% - 25%. Sistem kerja dari modulator *valve* untuk menjaga slip rasio 0,15 – 0,25, sehingga ketika slip rasio diatas 25% langkah kerja dari *inlet valve* pada modulator *valve* akan tertutup (*normally close*), sedangkan *outlet valve* pada modulator *valve* akan terbuka (*normally open*). Kemudian, ketika slip rasio dibawah 0,15% langkah kerja dari *inlet valve* pada modulator *valve* akan terbuka (*normally open*), sedangkan *outlet valve* pada modulator *valve* akan tertutup (*normally close*). Slip rasio yang optimal adalah 20%, sehingga langkah kerja dari *inlet valve* pada modulator *valve* akan tertutup (*normally close*) dan *outlet valve* pada modulator *valve* akan tertutup (*normally close*). Sistem ABS pada modulator *valve* bergantung pada 3 kondisi dari slip rasio yaitu slip rasio dibawah 15%, diatas 25%, maupun dengan kondisi optimal slip rasio sebesar 20% dengan batas frekuensi yang bekerja pada modulator *valve* adalah 3-9 Hz.

#### **2.2.4. Unit Generator untuk *Regenerative Braking***

*Regenerative braking* merupakan suatu metode pengereman yang menggunakan energi mekanik dari motor dan mengubah energi kinetik menjadi energi listrik yang akan dikembalikan ke baterai. Pada saat *regenerative braking*, motor akan menyebabkan kendaraan melambat dan motor akan beroperasi sebagai generator dan listrik yang dihasilkan akan masuk sebagai pengisi baterai (Gadewar & Jain, 2017).

Berdasarkan jurnal pada penelitian (Guo, et al., 2014) saat mode berkendara, motor bekerja sebagai penggerak roda dan saat mode *regenerative braking* bekerja sebagai generator yang akan

menghasilkan listrik. Sehingga, pada saat torsi motor bernilai positif, maka motor akan mengambil daya dari baterai dan ketika torsi motor bernilai negatif, maka motor akan bekerja layaknya generator yaitu mengisi daya dari baterai. Pengisian baterai tersebut disebabkan oleh adanya tegangan balik pada motor atau dikenal dengan *back EMF (electromagnetic force)*. Karakteristik respon dari torsi yang cepat dari motor dapat meningkatkan performansi *antilock* dari kendaraan. Pada **Gambar 2.9**, menunjukkan kurva maksimum torsi-speed dan pemetaan efisiensi dari motor di berbagai titik operasi.



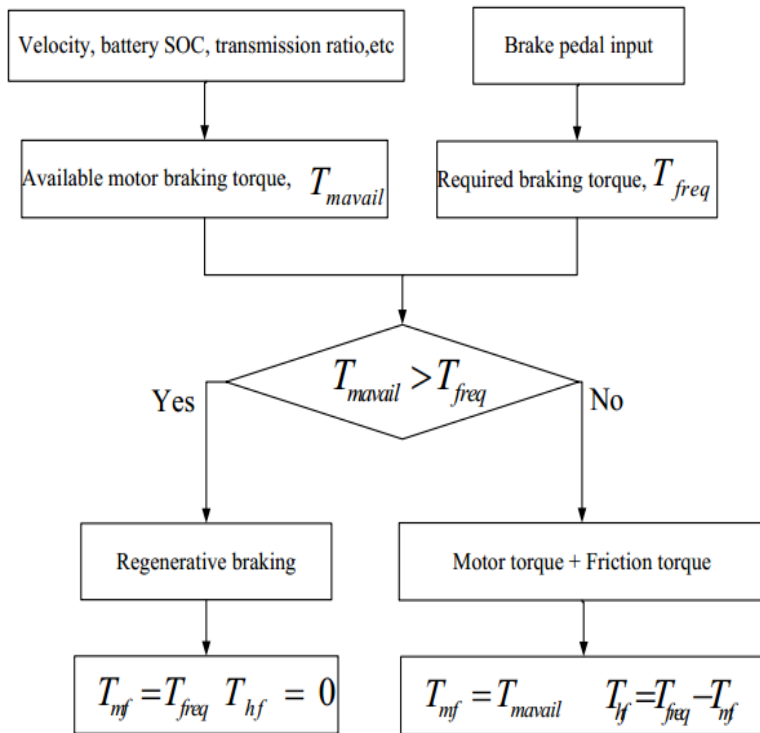
**Gambar 2.9** Kurva torsi-kecepatan dan pemetaan efisiensi dari motor (Guo, et al., 2014)

Perlu diketahui, torsi generator pada *regenerative braking* dari motor memiliki pengaruh dari berbagai faktor. Menurut jurnal (Peng, et al., 2008) sistem pengereman *regenerative* dibatasi oleh berbagai faktor seperti kecepatan motor, *state of charge* (SOC), dan temperatur baterai. Berbagai faktor tersebut mengharuskan pengereman *regenerative* pada mobil listrik beroperasi bersama



dengan sistem pengereman hidraulik (pengereman gesek antara ban dengan permukaan jalan). Pada penelitian ini faktor temperatur baterai akan diabaikan.

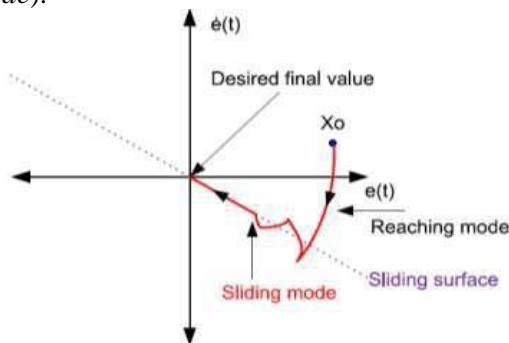
Sistem *regenerative braking* pada mobil listrik diperlukan suatu algoritma untuk menentukan bagaimana mendistribusikan sistem pengereman antara pengereman dari motor yang menjadi generator untuk *regenerative braking* dan pengereman hidraulik pada situasi pengereman normal atau pengereman darurat. **Gambar 2.10** menunjukkan diagram alir dari pengereman *regenerative* untuk menentukan bagaimana mendistribusikan sistem pengereman pada mobil listrik.



**Gambar 2.10** Diagram alir pada sistem pengereman *regenerative* di mobil listrik (Guo, et al., 2014)

### 2.3 Sliding Mode Control (SMC)

SMC adalah suatu metode pada teori kontrol modern yang menggunakan *state space* untuk menganalisa sebuah sistem (Nasir, et al., 2010). Penggunaan metode *state space* ini relatif mudah untuk digunakan pada model sistem yang kompleks dan *multi input multi output system* (MIMO). SMC dikenal dengan ketahanannya pada *high tracking trajectory* dan *robust* untuk mengestimasi paramater, diagnosis kesalahan, dan kontrol. Metode SMC ini dikembangkan agar dapat membuat sistem kontrol pada model yang kompleks dengan dinamik non-linear derajat tinggi yang bekerja pada keadaan tidak tentu (Rahmani, et al., 2016). SMC diterapkan pada ABS untuk melakukan *feedback on-off* berskala tinggi dalam penentuan aliran tekanan fluida pada distribusi tiap-tiap rem. SMC bekerja dengan cara mengendalikan *trajectory state* suatu sistem untuk menuju suatu permukaan luncur (*reaching mode*) dan mempertahankan nilai tertentu. Penentuan nilai permukaan luncur ini mempertimbangkan *state* dari suatu sistem dengan menggunakan fase bidang yang terdiri dari *error* dan turunan pertama dari *error* tersebut. Pada **Gambar 2.11** dapat dilihat bahwa pada saat dimulai dari berbagai kondisi, *trajectory state* ( $X_0$ ) akan menuju permukaan *sliding mode* (*reaching mode*), dan kemudian akan meluncur sepanjang permukaan menuju target (*sliding mode*).



**Gambar 2.11** Interpretasi grafik SMC (Holkar & Waghmare, 2013)

Langkah pertama dalam merancang SMC adalah dengan menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*). Persamaan *sliding surface* akan mengikuti persamaan (2.3), dimana hanya dipengaruhi oleh satu parameter skalar yaitu  $\lambda$  yang ditentukan oleh perancang sistem dan bernilai positif konstan (Slotine & Li, 1991).  $n$  adalah besarnya order dari suatu sistem.

$$S(t) = (\lambda + \frac{d}{dt})^{n-1} e(t) \quad (2.3)$$

Teori dari kestabilan Lyapunov digunakan untuk menstabilkan suatu sistem non-linier yang berubah terhadap waktu. Fungsi Lyapunov digunakan dan dapat dilihat pada persamaan (2.4), dimana persamaan tersebut dikatakan suatu fungsi definit positif apabila memenuhi syarat  $V(0) = 0, V > 0$ .

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.4)$$

Teori kestabilan Lyapunov berdasarkan penelitian dari (Rahmani, et al., 2016), menganggap bahwa sistem didefinisikan sebagai  $\dot{x} = f(x, t)$  dengan  $f(0, t) = 0$  untuk semua  $t$ . Apabila fungsi skalar yang terdapat pada  $V(x, t)$  bersifat kontinu, maka turunan parsial pertama fungsi tersebut memenuhi kondisi definit negatif. Pada keadaan ini, sistem mengalami *uniformly asymptotic stable*. Berdasarkan teori kestabilan Lyapunov dari penelitian (Rahmani, et al., 2016) yang diterapkan dipersamaan (2.4) untuk persamaan (2.5) dapat memenuhi syarat kestabilan sistem yang bersifat definit negatif. Nilai  $\varepsilon$  (epsilon) merupakan suatu konstanta positif.

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq -\varepsilon |s| < 0 \quad (2.5)$$

Fungsi signum (sgn) dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(x) &= \begin{cases} -1, & x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \\ \operatorname{sgn}(x) &= \frac{|x|}{x} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Ditinjau dari definisi fungsi signum, persamaan (2.6) dapat dituliskan dengan bentuk persamaan lainnya seperti pada persamaan (2.7) yang dapat disebut juga sebagai *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012).

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s), \varepsilon > 0 \quad (2.7)$$

Persamaan *sliding surface* adalah fungsi *error*. Nilai orde yang diberikan adalah  $n = 2$ , persamaan (2.3) dapat disederhanakan sebagai berikut.

$$S(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (2.8)$$

Melalui fungsi *error* dan turunannya, serta  $r$  merupakan posisi ideal, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$e(t) = r(t) - x(t) \quad (2.9)$$

Variabel *state*  $x(t)$  memenuhi persamaan *state space* berikut.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.10)$$

$A$  dan  $B$  merupakan matriks *state* dan matriks input, serta  $u(t)$  merupakan sinyal input (kontrol). Kemudian, dengan memperoleh turunan pertama dari persamaan (2.8) dan substitusi persamaan (2.9) dan persamaan (2.10), didapatkan persamaan berikut.

$$\dot{s} = \ddot{r}(t) - Ax(t) - Bu(t) + \lambda[\dot{r}(t) - \dot{x}(t)] \quad (2.11)$$

Adanya *constant rate reaching law*, maka persamaan (2.7) dapat disamakan dengan persamaan (2.11) yang kemudian diperoleh persamaan sebagai berikut.

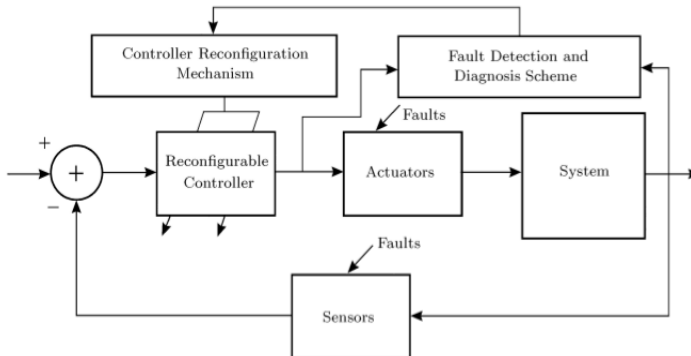
$$u(t) = \frac{1}{B}[\varepsilon \operatorname{sgn}(s) + \ddot{r}(t) - Ax(t) + \lambda(\dot{r}(t) - \dot{x}(t))] \quad (2.12)$$

## 2.5 Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC)

Pada suatu sistem kendali, peningkatan performa dan keamanan sangat dibutuhkan. Di industri proses, manufaktur, dan lainnya terkadang terjadi beberapa kerusakan terhadap komponen-komponen yang menyusun sistem seperti aktuator dan sensor. Sehingga, diperlukan suatu pengendalian yang dapat menoleransi kerusakan yang terjadi dengan tetap menjaga stabilitas sistem yang diinginkan dan salah satunya pengendalinya adalah dengan Sistem *Fault Tolerant Control* (FTC). FTC memiliki kemampuan mengakomodasi komponen secara otomatis dengan tetap mempertahankan kestabilan sistem dan performansi yang ditetapkan. Pada tiga dekade terakhir, sistem FTC telah diteliti dan sudah banyak metode yang ditawarkan pada literatur, baik dalam bentuk buku seperti (Blanke, et al., 2006) dan (Noura, et al., 2009), serta makalah tinjauan seperti (Patton, 1997) dan (Staroswiecki & Gehin, 2001). Tinjauan menyeluruh mengenai FTC secara ringkas dijelaskan pada (Jiang, 2005) dengan beberapa sudut pandang yaitu teori, praktek industri, dan tantangan potensial. Penjelasan rinci berupa tutorial tentang FTC dapat dibaca pada (Lunze & H, 2008), sedangkan tinjauan literatur secara komprehensif telah dilakukan oleh (Zhang & Jiang, 2008).

Tujuan utama dari sistem FTC yaitu merancang pengendali dengan struktur yang cocok untuk mencapai kestabilan dan kinerja yang diinginkan dan tidak hanya saat komponen pengendali berfungsi secara normal melainkan saat adanya kesalahan pada suatu komponen tersebut (Indriawati, et al., 2016). Sistem FTC dapat dibangun dengan 2 pendekatan yaitu *passive* dan *active*. *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) dirancang untuk mempertahankan sistem *closed loop* tetap sensitif terhadap

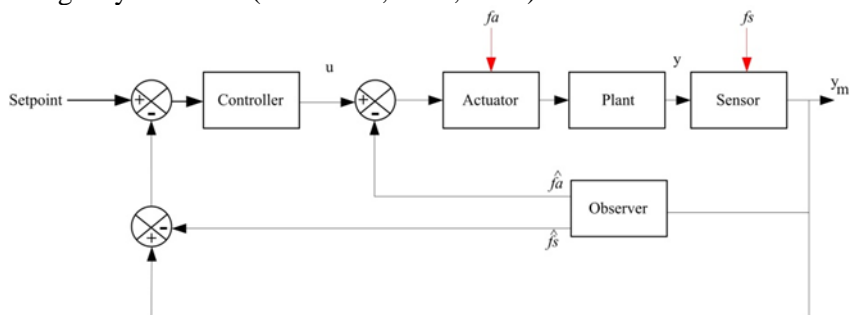
kegagalan yang terjadi, sedangkan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) bereaksi terhadap kegagalan komponen dengan merekonfigurasi aksi kontrol, sehingga kestabilan dan kinerja pada sistem dapat dijaga. Perbedaan mendasar antara PFTC dan AFTC yaitu pada perancangan *Reconfigurable Control* (RC) dan *Fault Detection and Diagnosis Scheme* (FDD) dimana perancangan tersebut diperlukan pada sistem AFTC sedangkan sistem PFTC tidak memerlukan perancangan tersebut.



**Gambar 2.12** Struktur umum AFTC (Jiang, 2005)

Berdasarkan penelitian (Jiang, 2005) struktur umum dari AFTC ditunjukkan dengan **Gambar 2.12**. *Fault Detection and Diagnosis Scheme* (FDD) adalah tahapan untuk mendeteksi *fault* atau kesalahan yang terjadi pada aktuator, sensor, maupun komponen penyusun dalam sistem. FDD berfungsi untuk mengestimasi *state* yang tidak terukur seperti kesalahan yang terjadi pada sistem. Ada 3 hal yang perlu dilakukan pada tahap FDD yaitu, mendeteksi kesalahan pada sistem serta waktu selang selama terjadinya kesalahan, mengisolasi lokasi kesalahan dan tipe kesalahan, dan terakhir mengidentifikasi kesalahan yang terjadi. Salah satu jenis FDD yang berfungsi untuk mengestimasi kesalahan dengan berdasarkan model matematik adalah *Observer* (Indriawati, et al., 2016). *Reconfiguration mechanism* berfungsi untuk memperbaiki ulang kesalahan awal pada performansi sistem dan menghindari akan adanya penurunan performansi setelah

terjadinya kesalahan. Perancangan sistem kendali yang toleran terhadap kesalahan aktuator dan sensor diperlukan konfigurasi ulang sinyal pengendali atau *reconfigurable controller* secara otomatis berdasarkan jenis kesalahan yang terjadi. *Reconfigurable controller* akan bekerja secara otomatis agar dapat memperbaiki kesalahan, sehingga sistem tetap bekerja sesuai keinginan. Berdasarkan hal tersebut adanya kesalahan yang terjadi, kemudian diestimasi dan hasil estimasi tersebut digunakan untuk mengatur ulang sinyal kendali (Indriawati, et al., 2013).



**Gambar 2.13** Skema *reconfigurable controller* (Indriawati, et al., 2016)

**Gambar 2.13** menunjukkan bahwa *estimation compensation* dan *fault diagnosis* merupakan bagian dari *observer*. *Fault diagnosis* bertujuan untuk mendefinisikan kesalahan dengan mendapatkan informasi dari sinyal hasil pengukuran. Adanya kesalahan pada aktuator maupun sensor saat proses pengukuran akan didiagnosa (*fault diagnosis*), sehingga akan terdefinisi sebagai sinyal kesalahan yang akan dikompensasi oleh *estimation compensation*. *Estimation compensation* akan mendapatkan input berupa sinyal kontrol dan sinyal hasil pengukuran. Hasil keluaran dari *estimation compensation* akan digunakan untuk merekonfigurasi sinyal dari aktuator maupun sensor yang mengalami kesalahan. *Estimation compensation* dan *fault diagnosis* akan mendapatkan input berupa sinyal kontrol ( $u$ ) dan sinyal hasil pengukuran ( $y$ ).

## 2.6 Observer State

*Observer* adalah algoritma yang berfungsi untuk mengestimasi keadaan (*state*) dari variabel yang tidak dapat terukur berdasarkan model matematis dari sistem. Pada buku (Ogata, 2010), *observer* berfungsi untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sistem dan *observer* merepresentasikan model matematis sistem pada persamaan ruang keadaan (*state space*) sistem yaitu pada persamaan (2.13) dan (2.14) berikut ini.

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.13)$$

$$y = Cx(t) + Du(t) \quad (2.14)$$

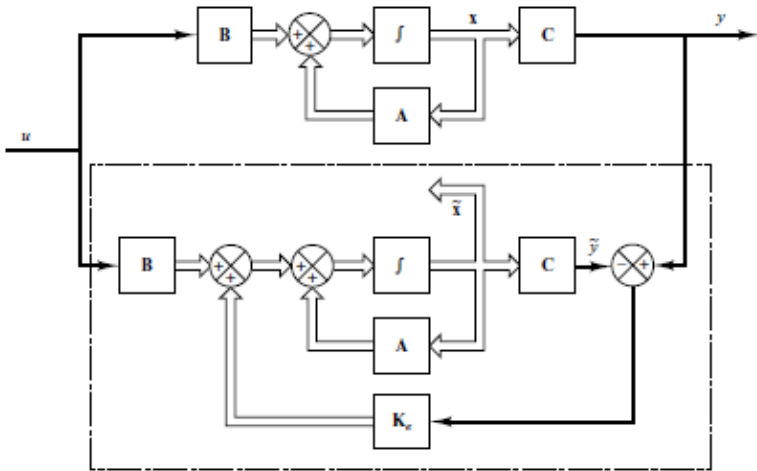
Dimana:

- $A$  = matriks keadaan (*state*) yang merepresentasikan fungsi alih dari *plant*
- $B$  = matriks nilai masukan
- $C$  = matriks hasil pengukuran
- $D$  = matriks nilai keluaran dari *noise*
- $x$  = *state*
- $u$  = kontrol *input*
- $y$  = *output* sistem
- $\dot{x}$  = Perubahan *state* terhadap waktu

Saat terjadi kesalahan pada aktuator maupun sensor, *observer* berfungsi untuk mengestimasi perbedaan antara keluaran yang diukur dengan estimasi keluaran. *Initial error* (eror inisial) merupakan perbedaan antara inisial keadaan dengan dengan inisial yang akan terestimasi (Ogata, 2010).

**Gambar 2.14** menunjukkan diagram blok dari sistem dan *observer state*. Berdasarkan gambar **Gambar 2.14**, *observer* sudah memiliki nilai *gain observer*. *Gain observer* merupakan matriks untuk mengoreksi perbedaan antara keluaran  $y$  hasil *actual* dan  $y$  *estimated*, sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi *state* yang tidak terukur (Ogata, 2010). Parameter yang mempengaruhi untuk menentukan nilai *gain observer* adalah nilai *pole* untuk menyatakan sistem stabil berada pada nilai tidak lebih dari 1 atau -1 pada sumbu imajiner atau sumbu riil.





**Gambar 2.14** Diagram blok dari sistem dan *observer state* (Ogata, 2010)

Model matematis *observer* sama seperti model matematis pada sistem sehingga *observer* dapat mengestimasi keadaan sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan. Untuk mengkompensasi kesalahan sensor pada waktu yang sama diperlukan modifikasi algoritma *observer* baru, algoritma tersebut dibentuk oleh (Indriawati, et al., 2016).

Efek dari kesalahan sensor dan aktuator direpresentasikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui bentuk vektor tersebut dan didefinisikan pada persamaan (2.19) maupun persamaan (2.20), dimana matriks tersebut bertindak pada sistem dinamik dan pengukuran seperti yang direpresentasikan pada persamaan (2.15) dan persamaan (2.16) (Indriawati, et al., 2016).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (2.15)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (2.16)$$

Tipe kesalahan sensor dan aktuator dimodelkan sebagai berikut:

$$s_f(t) = \alpha s(t) + \beta(t) \quad (2.17)$$

$$f(t) = s_f(t) - s(t) \quad (2.18)$$

$s_f(t)$  merupakan sinyal aktual,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah konstanta. Penambahan kesalahan  $f(t)$ , termasuk  $f_a(t)$  dan  $f_s(t)$  ditunjukkan persamaan (2.18).

Melalui persamaan (2.18) tersebut dapat didefinisikan persamaan baru sebagai berikut:

$$\dot{z}(t) = A_z[y(t) - z(t)] \quad (2.19)$$

$$\dot{z}(t) = A_z[Cx(t) + F_s f_s(t) - z(t)] \quad (2.20)$$

$A_z$  merupakan matriks identitas ( $I$ ), kemudian matriks dari kesalahan sensor dan aktuator didefinisikan sebagai  $f = \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix}$ .

Persamaan (2.20) tersebut dapat mendefinisikan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan matriks yang sudah diekspansi, persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.22).

$$\dot{x}_a = A_a X_a(t) + B_a U(t) + E_a f(t) \quad (2.21)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0_n \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0_n \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0_n \\ 0_n & A_z \cdot F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0_n \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0_n \end{bmatrix}, C_a = [0_n \quad C], E_a = \begin{bmatrix} F_a & 0_n \\ 0_n & A_z \cdot F_s \end{bmatrix}$$

Untuk mendapatkan nilai dari *gain observer* maka dipakai ekspansi melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan persamaan (2.23).

$$\hat{\dot{x}}(t) = A_a \hat{X} + B_a u + E_a \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + L_x(Y - \hat{Y}) \quad (2.23)$$

Sehingga matriks yang sudah di ekspansi ditunjukkan seperti pada persamaan berikut:

$$\widehat{A}_a = \begin{bmatrix} A_a & E_a \\ 0_n & 0_n \end{bmatrix}, \widehat{C}_a = [C_a \quad 0_n] \quad (2.24)$$

Penentuan *gain observer* formula yang dipakai untuk memperoleh nilai *gain observer* adalah formula *Auckerman* (Ogata, 2010) dengan keadaan awal estimasi dapat didefinisikan pada persamaan (2.25) dan juga skema *observer* juga ditunjukkan dengan diagram blok pada **Gambar 2.15**.

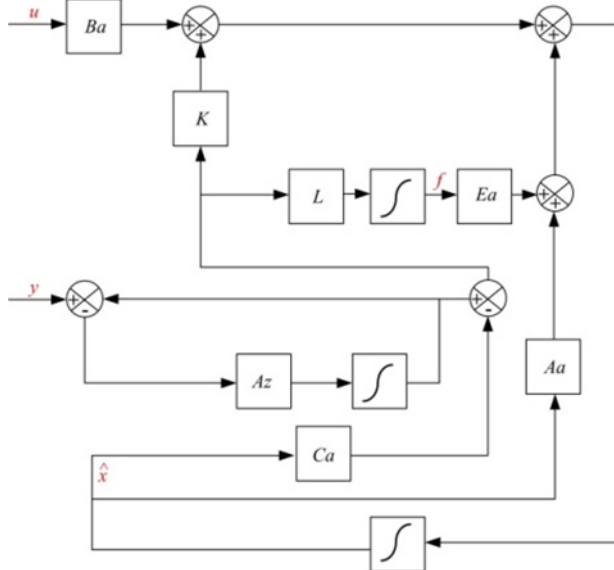
$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x} + Bu + K_e(Y - C\hat{x}) \quad (2.25)$$

Dimana:

$\hat{x}$  = keadaan estimasi

$C\hat{x}$  = keadaan estimasi keluaran

$K_e$  = Gain matriks *Observer*

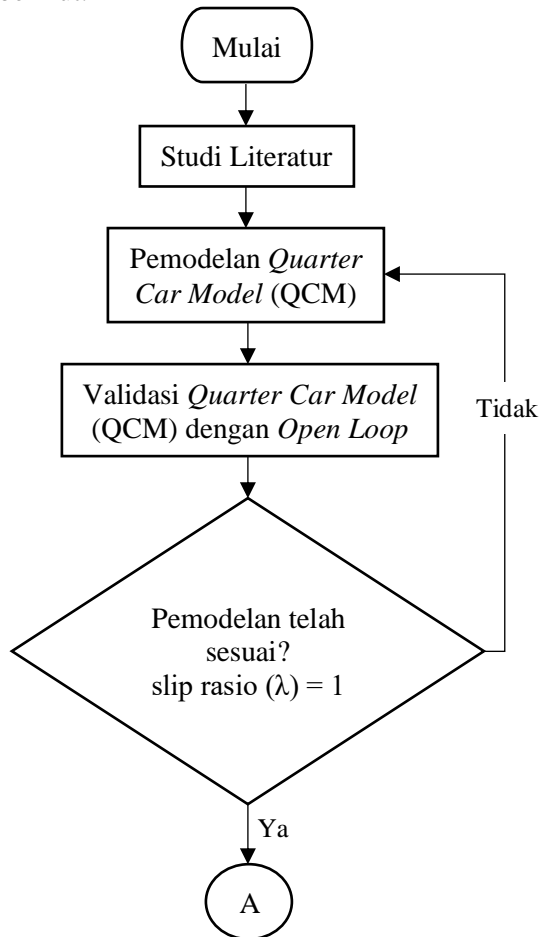


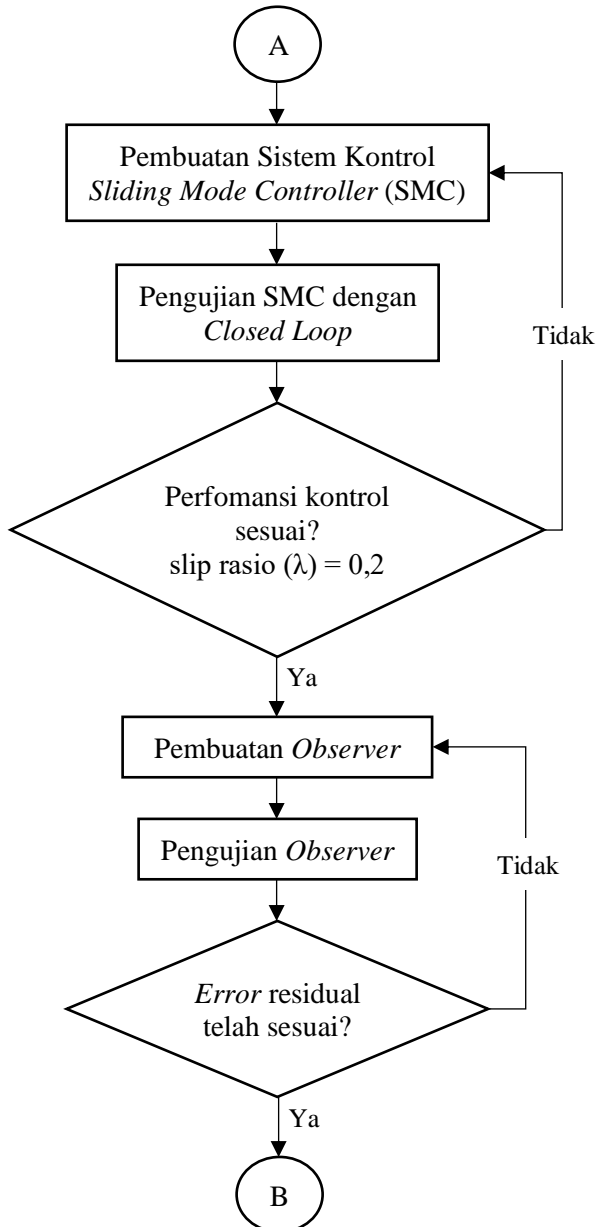
**Gambar 2.15** *Extended State Observer* (Indriawati, et al., 2016)

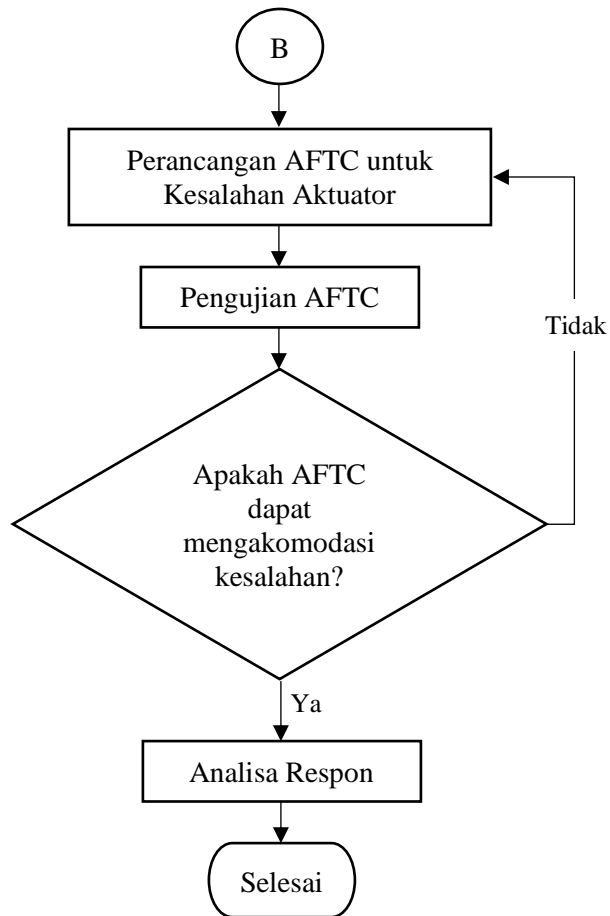
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III berisi mengenai metodologi penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir ini yang dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1** sebagai berikut.







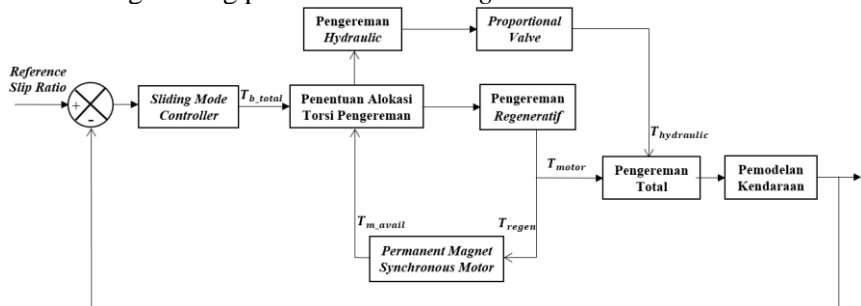
**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

Tahap studi literatur pada tugas akhir ini dimaksud untuk membangun pemahaman awal sampai mendalam secara teoritis terhadap materi yang mendukung penelitian tugas akhir ini dengan mengumpulkan literatur dan referensi yang relevan mengenai *regenerative anti-lock braking system*, pemahaman mengenai

sistem *sliding mode controller* (SMC), dan *active fault tolerant control* (AFTC).

### 3.1 Pemodelan *Quarter Car Model* (QCM)

Berdasarkan berbagai penelitian yang sudah dilakukan (Guo, et al., 2014) dan (Tur, et al., 2007), *Anti-Lock Braking System* (ABS) memiliki tiga model matematis yaitu *quarter car*, *half car*, dan *full car models*, sedangkan untuk tugas akhir ini menggunakan *quarter car model*, dimana *quarter car model* adalah representasi dari mobil dengan satu roda. *Quarter car model* diasumsikan ketiga roda lainnya memiliki karakteristik dan sistem yang sama dengan satu roda. Pemodelan keseluruhan sistem *quarter car model* pada *regenerative ABS* ini tampak pada diagram blok **Gambar 3.2**, dimana terbagi menjadi dua yaitu model dinamik gerak longitudinal kendaraan dan pemodelan motor sebagai komponen penting untuk *regenerative braking*. Berikut merupakan penjelasan dari masing-masing pemodelan untuk *regenerative ABS*.



**Gambar 3.2** Diagram blok *regenerative anti-lock braking system*

#### 3.3.1 Pemodelan Rem dari Aktuator Hidraulik pada *Quarter Car*

Pemodelan dinamik gerak longitudinal kendaraan untuk sistem pengereman pada *quarter car model* digunakan Hukum Newton II. Persamaan (3.1) menunjukkan Hukum Newton II yang menyatakan bahwa benda selalu berbanding lurus dengan gaya yang bekerja pada suatu benda dan berbanding terbalik dengan massa benda. Gaya-gaya yang bekerja pada sistem pengereman



untuk *quarter car model* ditunjukkan dengan **Gambar 3.3** antara lain, gaya *rolling resistance* ( $F_f$ ), gaya *aerodynamic resistance* ( $F_a$ ), dan gaya pengereman pada roda ( $F_x$ ). Persamaan gaya yang terjadi ditunjukkan dengan persamaan berikut ini.

$$m \cdot a = \sum F \quad (3.1)$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -4(F_x + F_a + F_f) \quad (3.2)$$

Dengan nilai gaya yang bekerja pada *quarter car model* antara lain sebagai berikut.

$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (3.3)$$

$$F_a = C_a \cdot v^2 \quad (3.4)$$

Dimana :

- $m$  = Massa kendaraan *quarter car model* (kg)
- $g$  = Gaya gravitasi ( $m/s^2$ )
- $C_a$  = Konstanta bentuk kendaraan ketika kecepatan angin diabaikan
- $v$  = Kecepatan kendaraan (m/s)
- $\mu$  = Koefisien gesekan antara roda dengan jalan dari gaya pengereman



**Gambar 3.3** Dinamika gaya yang bekerja pada kendaraan untuk *quarter car model* (Tur, et al., 2007)

Berdasarkan (Guo, et al., 2014), perhitungan koefisien gaya pengereman antara roda dengan jalan  $\mu$  melalui persamaan (2.1) yang ditunjukkan lagi melalui persamaan (3.5) berikut ini.

$$\mu(\lambda, v) = \left[ C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda \right] e^{-C_4\lambda v} \quad (3.5)$$

Dimana:

$C_1$  = Nilai maksimum kurva gesekan

$C_2$  = Bentuk kurva gesekan

$C_3$  = Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat  $\lambda = 1$

$C_4$  = Nilai karakteristik kebasahan jalan

**Tabel 3.1** Parameter koefisien gesekan pada permukaan *dry asphalt* (aspal kering) (Guo, et al., 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
$C_1$	Nilai maksimum kurva gesekan	1,029
$C_2$	Bentuk kurva gesekan	17,16
$C_3$	Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat $\lambda = 1$	0,523
$C_4$	Nilai karakteristik kebasahan jalan	0,03

Pemodelan gerak longitudinal kendaraan untuk *quarter car model* diperlukan informasi *slip ratio* yang sudah ada dipersamaan 2.2, dimana *slip ratio* akan dikendalikan dengan *set point* 0,2 berdasarkan pada penelitian (Tur, et al., 2007) dan kecepatan kendaraan berdasarkan pemodelan dari *simulink* perangkat lunak *Matlab R2013a*. Berikut merupakan persamaan dari *slip ratio* yang ditunjukkan kembali melalui persamaan (3.6).

$$\lambda = \frac{v - \omega R}{v} \quad (3.6)$$

Dimana:

$\omega$	= Kecepatan sudut pada roda	( <i>rad/s</i> )
$R$	= Jari – jari putaran roda	( <i>m</i> )
$V$	= Kecepatan kendaraan	( <i>m/s</i> )

Pemodelan roda secara rotasi untuk *quarter car model* yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4** dengan persamaan seperti berikut ini.

$$F_x \cdot R - T_h = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.7)$$

Dimana :

$R$	= Jari-jari putaran roda	( <i>m</i> )
$T_h$	= Torsi pengereman pada <i>hydraulic brake system</i>	( <i>N.m</i> )
$J$	= Momen inersia roda	( <i>kg.m<sup>2</sup></i> )
$\omega$	= Kecepatan sudut pada roda	( <i>rad/s</i> )

**Tabel 3.2** Parameter pemodelan kendaraan pada gaya pengereman (Guo, et al., 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
$m$	Massa <i>quarter car model</i>	342,5 <i>kg</i>
	Massa <i>full car model</i>	1370 <i>kg</i>
$g$	Gaya gravitasi	9,8 <i>m/s<sup>2</sup></i>
$Ca$	Konsanta bentuk kendaraan (kecepatan angin diabaikan)	0,2921
$R$	Jari-jari putaran roda	0,33 <i>m</i>
$J$	Momen inersia roda	3,5 <i>kg.m<sup>2</sup></i>
$F_f$	Gaya <i>rolling resistance</i>	201,39 <i>N</i>

Setelah dilakukan pemodelan kendaraan, tahap selanjutnya yaitu memodelkan aktuator hidraulik dengan skema dari ABS *hydraulic brake system* ditunjukkan pada **Gambar 3.5**. Aktuator yang digunakan pada sistem ini adalah tipe *proportional valve*. Pemodelan aktuator hidraulik menggunakan fungsi orde satu.



faktor temperatur baterai akan diabaikan. Tujuan dari SOC adalah untuk menjaga agar baterai dapat terhindar dari *overcharging* yang dapat mempengaruhi umur baterai. Faktor bobot  $k_{soc}$  pada SOC dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$K_{soc} = \begin{cases} 1 & SOC \leq 0,8 \\ 10 (0,9 - SOC) & 0,8 < SOC \leq 0,9 \\ 0 & 0,9 < SOC < 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

Sedangkan faktor yang dapat mempengaruhi kecepatan sudut motor berasal dari rendahnya gaya elektrik motor (voltase) yang dihasilkan pada saat kecepatan rotasi rendah. Faktor bobot  $K_{\omega_m}$  pada kecepatan sudut motor dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$K_{\omega_m} = \begin{cases} 0 & \omega_m \leq 50 \text{ rad/s} \\ (\omega_m - 50)/50 & 50 < \omega_m \leq 100 \text{ rad/s} \\ 1 & 0,9 < 100 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (3.10)$$

Setelah SOC baterai dan kecepatan sudut motor diketahui, torsi motor yang menjadi generator ketika adanya pengereman,  $T_{generator}$ , dapat dihitung sebagai berikut.

$$T_{generator} = \frac{T_{mmax} \cdot I \cdot K_{\omega_m} \cdot K_{SOC}}{\eta_t} \quad (3.11)$$

Dimana:

$T_{mmax}$  = Torsi motor maksimum ( $N.m$ )

$I$  = Rasio transmisi

$\eta_t$  = Efisiensi transmisi

**Tabel 3.3** Parameter simulasi pada motor (Guo, et al., 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
$T_{mmax}$	Torsi motor maksimum	150 $N.m$
$I$	Rasio transmisi	4,1
$\eta_t$	Efisiensi transmisi	0,95

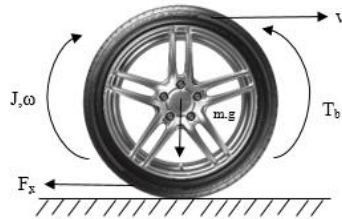
Sehingga dengan adanya pemodelan rem pada aktuator hidrolik dipersamaan (3.7) dan pemodelan rem pada aktuator motor yang menjadi generator dipersamaan (3.11) diperoleh persamaan berikut ini.

$$F_x \cdot R - (T_h + T_g) = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.12)$$

$$F_x \cdot R - T_b = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.13)$$

Dimana :

$R$	= Jari-jari putaran roda	(m)
$T_b$	= Torsi hidrolik dan torsi generator	(N.m)
$J$	= Momen inersia roda	(kg.m <sup>2</sup> )
$\omega$	= Kecepatan sudut pada roda	(rad/s)



**Gambar 3.5** Dinamika yang bekerja pada *quarter car model* untuk *regenerative ABS*

### 3.2 Pembuatan Sistem Kontrol *Sliding Mode Controller* (SMC)

Perancangan *sliding mode controller* menggunakan *simulink MATLAB R2013a* dalam blok sistem pengendalian *close loop* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.6**. Hal pertama yang dilakukan untuk merancang *sliding mode controller* adalah menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*) agar dapat memenuhi spesifikasi dari desain *plan*. Selanjutnya adalah dengan merekonstruksi *gain switched feedback* agar dapat mengendalikan *trajectory state plant* menuju *sliding surface*. Persamaan (3.2) dan (3.3) merepresentasikan model matematis dari gerak longitudinal kendaraan maupun gerak rotasi roda pada sistem ABS.

$$m \cdot a = \sum F \quad (3.14)$$

$$m \cdot \dot{v} = -4(F_x + F_a + F_f) \quad (3.15)$$

$$F_x \cdot R - T_h = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.16)$$

Adanya motor pada penggerak roda sehingga ketika adanya pengereman darurat, motor akan menjadi generator dan menyebabkan persamaan pada (3.16) menjadi sebagai berikut.

$$J \cdot \dot{\omega} = F_b \cdot R - T_b - T_f \quad (3.17)$$

Dimana  $T_b$  merupakan torsi pengereman yang dibutuhkan oleh sistem pengereman dengan  $T_b = T_h + T_g$ . Torsi pengereman yang dibutuhkan tersebut merupakan gabungan antara torsi pengereman pada *hydraulic brake system* ( $T_h$ ) dan motor yang menjadi generator ( $T_g$ ). Sehingga, diperlukan gaya pengereman pada roda dengan adanya motor yang mana dinotasikan sebagai  $F_b$  dengan nilai konstan dari  $F_b = 3960$ . Kemudian  $T_f$  merupakan torsi dari gaya *rolling resistance*.

Adapun persamaan *slip ratio* dapat didefinisikan sebagai persamaan berikut.

$$\lambda_l = \frac{V - \omega R}{V} = 1 - \frac{\omega R}{V} \quad (3.18)$$

Selanjutnya adalah persamaan (3.18) dideferensialkan menjadi persamaan sebagai berikut.

$$\dot{\lambda}_l = -\frac{R\dot{\omega}}{V} + \frac{R\omega \cdot \dot{V}}{V^2} \quad (3.19)$$

Kemudian persamaan (3.15) dan (3.17) disubstitusikan ke persamaan (3.19), sehingga persamaannya adalah sebagai berikut.

$$\dot{\lambda}_i = \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_b + \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_f - \frac{R^2}{J} \frac{1}{V} F_b - \frac{R\omega}{V} \frac{1}{m} \sum F_b - \frac{R\omega}{m} \cdot C_a - \frac{R\omega}{mv^2} F_f \quad (3.20)$$

Untuk mendapatkan nilai *slip ratio* terukur ( $\dot{\lambda}_i$ ) yang sesuai dengan *slip ratio* yang diinginkan ( $\lambda_{des}$ ), maka *slip ratio* digunakan sebagai *sliding surface* yang didefinisikan sebagai berikut.

$$S = \lambda_{des} - \lambda_i \quad (3.21)$$

Dengan fungsi signum (sgn) dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$sgn(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

Adanya definisi dari fungsi singnum, persamaan (3.21) dapat dituliskan ke bentuk lain seperti pada persamaan (3.23) yang dapat disebut juga sebagai *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012).

$$\dot{S} = -\varepsilon sgn(S) - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (3.23)$$

Dimana  $\varepsilon$  (epsilon) dan  $k$  adalah positif konstan. Kemudian, Fungsi error dan turunan dari *slip ratio* disubstitusikan dengan persamaan (3.20) dan (3.23), sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut.

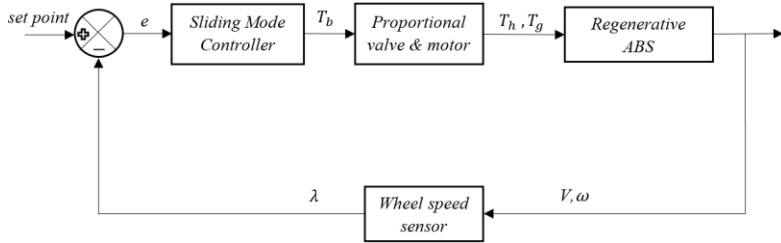
$$\dot{\lambda}_{des} - \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_b + \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_f - \frac{R^2}{J} \frac{1}{V} F_b - \frac{R\omega}{V} \frac{1}{m} \sum F_b - \frac{R\omega}{m} \cdot C_a - \frac{R\omega}{mv^2} F_f = -\varepsilon sgn(S) - kS \quad (3.24)$$

Sinyal kontrol yang digunakan pada sistem merupakan sinyal kontrol untuk pengendalian torsi dari sistem pengereman, sehingga



$T_{bi}$  digunakan sebagai input sinyal kontrol dari aktuator *hydraulic brake system* dan motor, maka persamaannya berubah menjadi persamaan berikut.

$$T_b = -T_f + R \cdot F_b + \frac{J \cdot \omega}{mV} \sum F_b + \frac{J \cdot \omega \cdot V}{m} \cdot C_a + \frac{J \cdot \omega}{mV} \cdot F_f + \frac{J \cdot V}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(\lambda_{des} - \lambda_i) + k(\lambda_{des} - \lambda_i)] \quad (3.25)$$



**Gambar 3.6** Skema diagram blok perancangan *sliding mode controller*

### 3.3 Pembuatan *Observer*

Tahap pembuatan *observer* ini dilakukan agar dapat mengestimasi kesalahan yang terjadi di aktuator pengereman hidraulik. Langkah pertama untuk pembuatan *observer* adalah dengan mengubah fungsi transfer aktuator hidraulik pada persamaan (3.26) ke bentuk *state space*.

$$G(s) = \frac{1}{0,01s+1} \quad (3.26)$$

$$\frac{T_h(s)}{u(s)} = \frac{1}{0,01s+1} \quad (3.27)$$

Setelah dikalikan silang, diperoleh persamaan (3.28) berikut ini.

$$\dot{T}_h = -100T_h + 100u \quad (3.28)$$

Dengan persamaan  $T_b = T_h + T_g$  diubah ke bentuk *state space* maka persamaannya sebagai berikut:

$$\dot{T}_b = \dot{T}_h + \dot{T}_g \quad (3.29)$$

Kemudian persamaan (3.28) disubstitusikan ke bentuk persamaan (3.29), sehingga menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\dot{T}_b = -100T_h + 100u + \dot{T}_g \quad (3.30)$$

Dari persamaan (3.30) dapat diketahui nilai  $T_h$  dengan substitusi persamaan  $T_b = T_h + T_g$ , sedangkan untuk nilai  $\dot{T}_g$  dianggap konstan. Maka diperoleh persamaan baru untuk fungsi keadaan estimasi dari sistem dan persamaan  $\dot{T}_b$  menjadi sebagai berikut:

$$\dot{T}_b = -100T_b + 100T_g + 100u \quad (3.31)$$

Langkah kedua yaitu dengan pemodelan gerak dinamis kendaraan pada persamaan (3.2), diperoleh persamaan untuk fungsi keadaan estimasi dari sistem yang ditunjukkan melalui persamaan 3.29 berikut:

$$\dot{V} = \frac{-4(F_x + F_a + F_f)}{m} \quad (3.32)$$

Dengan parameter dari  $F_x$ ,  $F_a$ ,  $F_f$ , dan  $m$  sudah diketahui sehingga persamaan  $\dot{V}$  menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\dot{V} = -(0,098V + 0,0116F_x + 0,0116F_a) \quad (3.33)$$

*Output* estimasi dari sistem menjadi  $\dot{T}_b$  dan  $\dot{V}$ , sehingga *output* dari sistem jika dialih fungsikan ke dalam bentuk matriks menjadi persamaan (3.34) berikut ini:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_b \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -100 & 0 \\ 0 & -0,098 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_b \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 100 & 0 & 100 \\ -0,0116 & 0 & -0,0116 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ U \\ F_a \\ T_m \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$A = \begin{bmatrix} -100 & 0 \\ 0 & -0,098 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 100 & 0 & 100 \\ -0,016 & 0 & -0,0116 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = 0, F_a = \begin{bmatrix} 100 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Seperti yang dijelaskan pada persamaan (2.22) dan persamaan (2.23), maka bentuk dari matriks ruang keadaan dapat di ekspansi menjadi.

$$Aa = \begin{bmatrix} -100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0980 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Ba = \begin{bmatrix} 0 & 100 & 0 & 100 \\ -0,0116 & 0 & -0,0116 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Ca = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Ea = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Untuk memperoleh nilai *gain observer*, maka matriks ruang keadaan diekspansi lagi menjadi bentuk berikut:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -100 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & -0,0980 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Menyelesaikan *observer* maka diperlukan pemilihan dari nilai *pole placement*, nilai *pole placement* diperoleh melalui *trial and error* dan yang digunakan adalah sebagai berikut:

*Pole ke-1* = -100,0023

*Pole ke-2* = -0,5498 + 0,8116i

*Pole ke-3* = -0,5498 - 0,8116i

*Pole ke-4* = -0,3259 + 1,0274i

*Pole ke-5* = -0,3259 - 1,0274i

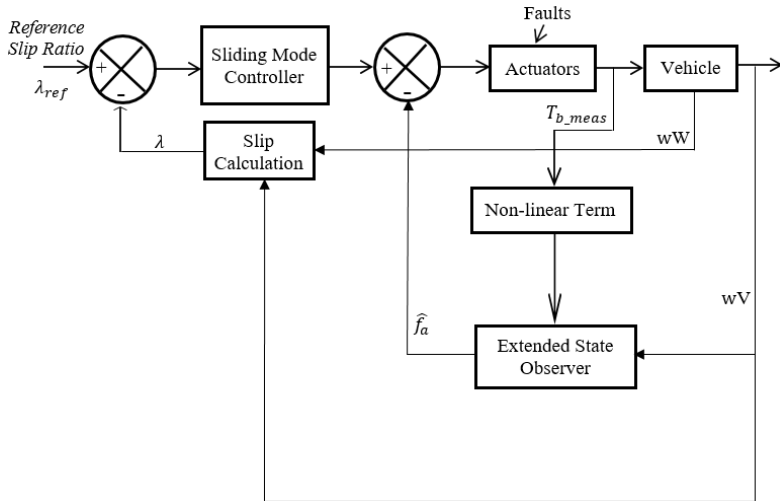
*Pole ke-6* = -0,0000 + 0,0000i

Dengan metode *pole placement* diatas, didapatkan nilai *gain observer* sebagai berikut.

$$Ke = \begin{bmatrix} 0,8970 & -0,1741 & -0,2964 & 0,0325 & 1,1255 & 0 \\ 0,0521 & 0,8907 & 0,1969 & -0,0479 & 0,0526 & 0 \end{bmatrix}$$

Langkah selanjutnya adalah *observer* dimasukkan ke sistem, kemudian disimulasikan pada perangkat lunak *simulink Matlab R2013a*.

### 3.4 Perancangan Sistem *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk Kesalahan Aktuator



**Gambar 3.7** Diagram blok perancangan AFTC pada *regenerative anti-lock braking system*

Tujuan dari perancangan sistem AFTC adalah untuk mengkompensasi kesalahan yang telah diestimasi oleh *observer*. Pada kesalahan bias maupun kesalahan *loss of effectiveness*, sinyal pengukuran awal akan ditambahkan dengan estimasi kesalahan,  $f_a$ , seperti pada persamaan (3.35).

$$T_{b\_fault} = T_{b\_meas} + f_a \quad (3.35)$$

Untuk mencari kesalahan residual,  $\hat{f}_a$ , sinyal pengukuran awal dengan kesalahan bias ataupun kesalahan *loss of effectiveness* dikurangi sinyal pengukuran hasil *observer*, seperti pada persamaan (3.36).

$$\hat{f}_a = T_{b\_fault} - T_{b\_obs} \quad (3.36)$$

### **3.5 Pengujian Sistem *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk Kesalahan Aktuator**

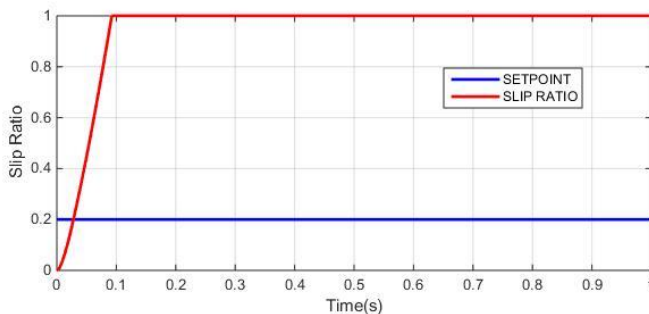
Pengujian sistem AFTC bertujuan agar dapat mengetahui sistem yang telah dirancang mampu untuk mengatasi dan mengkompensasi kesalahan pada aktuator hidraulik. Kesalahan yang terjadi pada aktuator hidraulik berupa kesalahan bias dengan nilai 9%, 12%, 16% dan kesalahan *loss of effectiveness* dengan nilai 6%.

## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Bab IV akan menjelaskan mengenai hasil perancangan dari *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada sistem pengendalian torsi pengereman untuk *regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS) yang telah dilakukan dan disimulasikan dengan perangkat lunak *Matlab R2013a* yang selanjutnya dilakukan uji performansi sistem. Uji performansi dilakukan agar mengetahui AFTC yang telah dirancang dapat bekerja dengan baik atau tidak untuk mengakomodasi kesalahan pada aktuator hidrolik.

### 4.1 Uji Validasi Pemodelan *Quarter Car Model* (QCM)

Penelitian yang berbasis simulasi dengan *simulink Matlab R2013a*, pemodelan harus diuji dengan adanya tahapan validasi agar dapat memastikan pemodelan dari simulasi memperoleh respon simulasi penelitian yang benar sesuai pada jurnal acuan. Pengujian dilakukan dengan *open loop* dengan tanpa ABS yang tampak seperti **Gambar 4.1** dibawah ini.

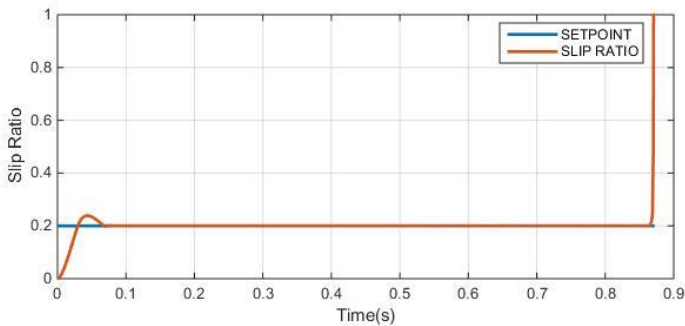


**Gambar 4.1** Respon dari uji *open loop* pada simulasi

Hasil respon dari **Gambar 4.1** menunjukkan bahwa *slip ratio* tanpa ABS stabil pada angka 1 yang berarti roda telah terkunci dan berhenti berputar sampai kecepatan mobil berakhir, saat terjadi pengereman.

#### 4.2 Uji *Close Loop* Menggunakan *Sliding Mode Controller*

Uji *close loop* pada simulasi dibuat dengan menyerupai gambar diagram blok 3.5 melalui *simulink* perangkat lunak *Matlab 2013a*. Pada pengujian ini dilakukan sebagai peninjau untuk respon pengendalian dari *slip ratio* dapat stabil di *setpoint*. Pengujian *close loop* dilakukan menggunakan *sliding mode controller* (SMC) dengan nilai  $\varepsilon = 3$ ,  $k = 10$  ke model *quarter car model* (QCM).



**Gambar 4.2** Respon *slip ratio* pada sistem *close loop* dengan pengendalian *sliding mode controller*

**Tabel 4.1** Parameter performansi sistem pengendalian untuk uji *close loop*

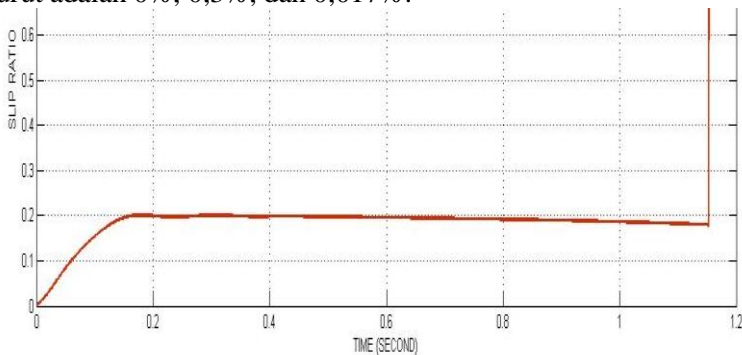
Parameter Perfomansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	19,4 %
<i>Settling Time</i>	0,0808 s
<i>Error Steady State</i>	0,9 %

Hasil grafik dari **Gambar 4.3** menunjukkan bahwa respon berada disekitar *setpoint* dan menuju nilai 1 saat kendaraan berhenti pada detik ke – 0,8721. Dapat dilihat bahwa sistem pengendali telah memenuhi kriteria perfomansi kontrol dari *setpoint* yaitu 0,2 dan respon variabel stabil disekitar *setpoint*. Pada **Tabel 4.1** menunjukkan performansi sistem dari sistem pengendalian.

Penelitian *slip ratio* pada ABS yang sudah dilakukan (Arigi, 2018) menggunakan kontrol PID *Auto Tuning* dengan nilai  $K_p$ ,  $K_i$ ,



dan  $K_d$  berturut-turut adalah 330, 275, 14. Respon dari hasil grafik pada **Gambar 4.4** menunjukkan bahwa respon berada di wilayah *setpoint* dan menuju nilai 1 saat kendaraan berhenti pada detik ke 1,18. Dapat dilihat bahwa sistem pengendali telah memenuhi kriteria performansi kontrol yang diinginkan dan respon variabel sudah stabil di *setpoint* yaitu 0,2 Nilai parameter performansi dari *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state* berturut-turut adalah 0%, 0,3%, dan 0,017%.



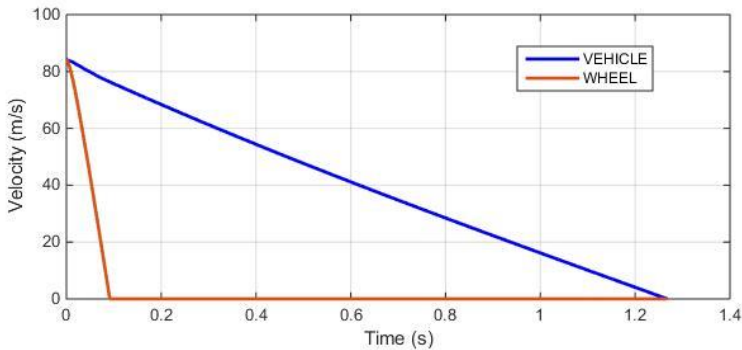
**Gambar 4.3** Respon *slip ratio* pada sistem *close loop* ABS dengan *Auto Tuning* PID (Arigi, 2018)

**Gambar 4.3** yaitu respon dari *slip ratio* pada sistem *close loop* dengan pengendalian *sliding mode controller* dan **Gambar 4.4** yaitu respon *slip ratio* pada sistem *close loop* ABS dengan *Auto Tuning* PID menunjukkan perbandingan dari keduanya. Perbandingannya yaitu pengendalian yang menggunakan *sliding mode controller*, respon berada disekitar *setpoint* dan menuju nilai 1 saat kendaraan berhenti pada detik ke 0,8721s. Sedangkan pada pengendalian yang menggunakan PID *Auto Tuning*, respon berada di wilayah *setpoint* dan menuju nilai 1 saat kendaraan berhenti pada detik ke-1,18s. Hal tersebut menyatakan bahwa dengan menggunakan *sliding mode controller* waktu henti dari kendaraan ketika ada pengereman mendadak lebih cepat daripada PID *Auto Tuning*. Oleh karenanya itu dapat dinyatakan bahwa *sliding mode control* lebih baik digunakan daripada kontrol PID *Auto Tuning*

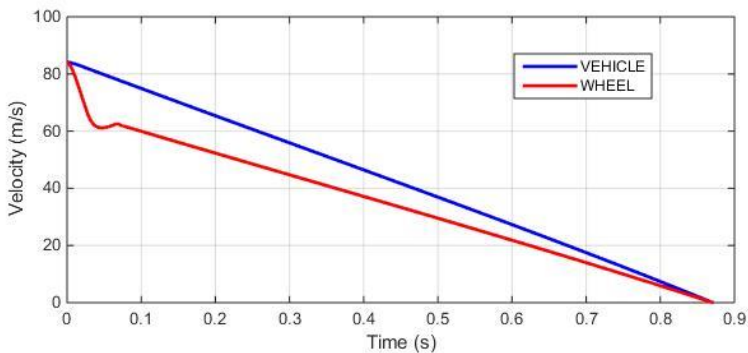
untuk pengendalian *slip ratio* pada *Anti-lock Braking System* (ABS).

### 4.3 Respon Kecepatan Kendaraan dan Roda

Respon selanjutnya yang ditinjau adalah kecepatan kendaraan dan roda. Pada sistem *anti-lock braking system* (ABS) faktor kecepatan kendaraan dan roda merupakan dua hal yang penting. ABS berfungsi untuk menjaga kecepatan roda agar tidak berhenti berputar ketika adanya pengereman secara keras dengan cara menyesuaikan kecepatan roda dengan kendaraan secara bersamaan. Perbedaan tanpa ABS dan dengan adanya ABS seperti terlihat pada **Gambar 4.4** dan **Gambar 4.5**.



**Gambar 4.4** Respon kecepatan kendaraan dan roda tanpa ABS

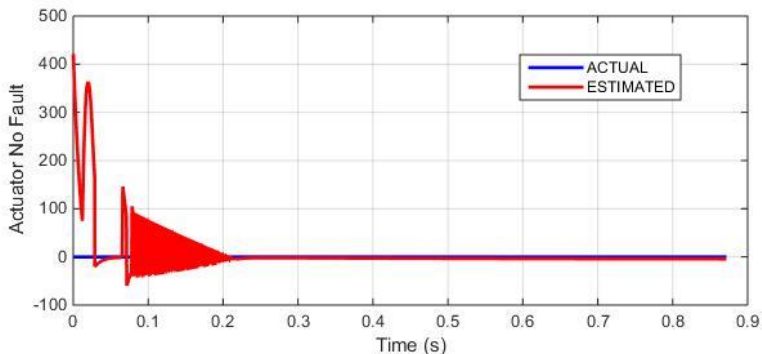


**Gambar 4.5** Respon kecepatan kendaraan dan roda dengan ABS

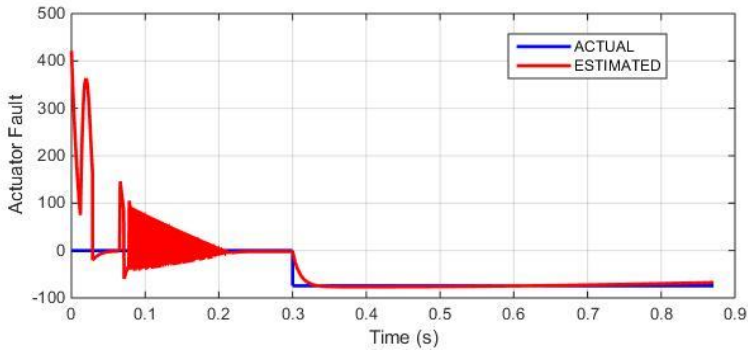
Tanpa ABS seperti pada **Gambar 4.4** kecepatan roda berhenti pada detik ke-0,1s; sedangkan kecepatan mobil berhenti pada detik ke-1,25s. Hal tersebut menyatakan waktu berhenti kendaraan terlalu panjang dengan waktu berhenti dari roda dan kendaraan selisih 1,15s; sehingga dapat mengakibatkan jarak henti kendaraan semakin panjang serta manuverabilitas dari kemudi kendaraan tidak stabil karena roda yang sudah terkunci dengan kecepatan roda yang 0. Adanya ABS seperti pada **Gambar 4.5** kecepatan roda dapat menyesuaikan kecepatan dari mobil dengan berhenti bersamaan pada detik ke- 0,87s. Hal tersebut menyatakan dengan adanya ABS kecepatan roda dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan mobil saat kondisi kecepatan mobil mengalami perlambatan, sehingga dapat meningkatkan manuverabilitas kemudi kendaraan.

#### 4.4 Hasil dari Estimasi *Observer*

Tahap ini dilakukan simulasi agar dapat menganalisa *observer* yang dibuat sudah mampu mengestimasi kesalahan yang diujikan. Simulasi pertama dilakukan pada *plant* ketika tidak terjadi kesalahan yang ditunjukkan dengan **Gambar 4.6**. Simulasi kedua dilakukan pada *plant* ketika terjadi kesalahan dengan kesalahan bias ditunjukkan dengan **Gambar 4.7**.



**Gambar 4.6** Hasil estimasi *observer* tanpa kesalahan



**Gambar 4.7** Hasil estimasi *observer* dengan kesalahan bias 9%

**Gambar 4.6** dapat dilihat bahwa garis biru menunjukkan respon *actual* dari *real plant* yang direpresentasikan sebesar 0 dikarenakan tanpa adanya kesalahan, sedangkan garis merah merepresentasikan hasil estimasi dari *observer* tanpa adanya kesalahan. Grafik hasil estimasi dari *observer* tanpa ada kesalahan, pada detik ke-0 sampai dengan detik ke-0,23 merepresentasikan unjuk kerja dari aktuator motor sehingga respon estimasi dari *observer* pada detik ke-0 sampai dengan detik ke-0,23 tidak mengikuti respon *actual* pada *real plant* dikarenakan *observer* hanya mampu mengestimasi untuk aktuator hidraulik yang ditunjukkan pada detik ke-0,24 sampai dengan detik ke-0,87 yaitu garis merah mengikuti garis biru. Kedua grafik respon dari *real plant* dan hasil estimasi dari *observer* untuk aktuator hidraulik sudah memiliki hasil yang sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa *observer* yang telah dirancang sudah mampu merepresentasikan *plant* yang telah dimodelkan.

**Gambar 4.7** menunjukkan grafik respon dengan adanya kesalahan berupa kesalahan bias sebesar 9% pada *real plant* dengan kesalahan yang diberikan pada aktuator hidraulik berupa sinyal *step* dengan waktu terjadinya kesalahan pada detik ke-0,3. Garis biru merupakan kesalahan *actual* dari *real plant* dan garis merah merupakan estimasi dari *observer* ketika ada kesalahan. Hasil estimasi dari *observer* sudah mampu mengikuti respon yang

dihasilkan dari kesalahan *actual* pada *real plant* untuk kesalahan pada aktuator hidraulik.

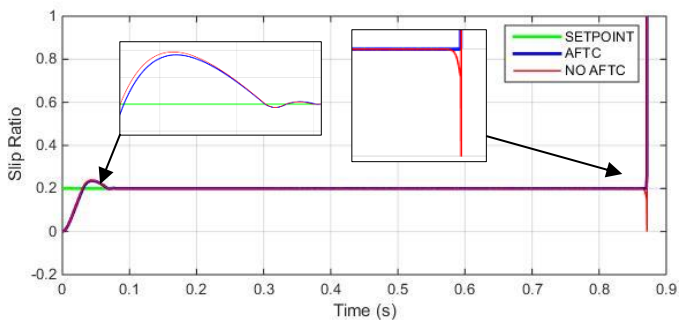
#### 4.5 Uji Kesalahan Aktuator

Tahap ini dilakukan uji kesalahan pada aktuator hidraulik dengan kesalahan yang terjadi berupa kebocoran yang mana kebocoran tersebut akan mengurangi laju aliran variabel manipulasi yang akan masuk ke sistem *quarter car model* (QCM). Kesalahan sistem yang diberikan ke aktuator hidraulik pada detik ke 0,3 dengan total waktu sampling saat simulasi 1 detik. Tidak adanya data kuantitatif dari kesalahan kebocoran dan nilai dari bukaan *valve* untuk aktuator hidraulik, sehingga adanya kebocoran dan kurang efektifnya bukaan dari *valve* diasumsikan sebesar 9%, 12%, 16% dan untuk kurang efektifnya bukaan dari *valve* diasumsikan sebesar 6% yang artinya adalah laju aliran yang efektif dari variabel manipulasi hanya 91%, 88%, dan 84%. Kesalahan berupa kebocoran pada aktuator hidraulik dinamakan kesalahan bias, sedangkan untuk kesalahan pada bukaan dari *valve* untuk aktuator hidraulik dinamakan kesalahan *loss of effectiveness*. Kesalahan bias maupun *loss of effectiveness* tersebut mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil dan tidak terkendali. Berikut ini merupakan uji kesalahan bias yang dapat diakomodasi oleh sistem agar sistem dengan performansi yang bekerja hanya 91%, 88%, dan 84% kesalahan bias dan 94% kesalahan *loss of effectiveness* dapat stabil dengan baik.

##### 4.4.1 Uji Kesalahan Bias 9%

Kesalahan bias 9% ditunjukkan pada grafik respon melalui **Gambar 4.8**. **Gambar 4.8** terlihat respon sistem saat diberikan kesalahan pada detik ke 0,3. Dapat diketahui dari gambar yang diperbesar tersebut, respon sistem saat diberikan kesalahan bias 9% yang berarti sistem berkerja hanya 91%. Pada respon *slip ratio* yang belum adanya AFTC, saat detik ke-0,86 respon *slip ratio* turun dan pada detik ke-0,87 sudah tidak stabil dan nilai *slip ratio* menyentuh angka 0. Hal tersebut menunjukkan bahwa kendaraan tetap melaju dan tidak stabil hingga kendaraan berhenti karena

menabrak. Dengan adanya AFTC pada detik ke-0,86, respon dari *slip ratio* tetap *steady* pada *setpoint* 0,2 hingga pada detik ke 0,87 nilai *slip ratio* menyentuh angka 1. Perbedaan dari kedua hal tersebut yaitu tanpa AFTC menyebabkan kemudi kendaraan menjadi tidak stabil dengan performansi sistem sebesar 91% saat adanya pengereman darurat, kemudian dengan adanya AFTC memiliki kelebihan yaitu kendaraan lebih stabil saat adanya pengereman darurat sampai kendaraan berhenti. Parameter performansi kesalahan bias 9% dapat ditunjukkan pada **Tabel 4.2**.



**Gambar 4.8** Grafik respon dari hasil uji kesalahan bias 9%

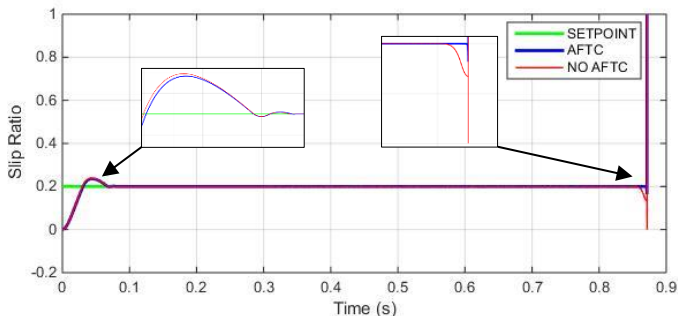
**Tabel 4.2** Parameter performansi kesalahan bias 9 %

Parameter Performansi	SMC tanpa AFTC	SMC dengan AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	19,4 %	18,3 %
<i>Settling Time</i>	0,0808 s	0,0816 s
<i>Error Steady State</i>	0,9 %	0,9%

#### 4.4.2 Uji Kesalahan Bias 12%

Kesalahan bias 12% ditunjukkan pada grafik respon melalui **Gambar 4.9**. **Gambar 4.9** terlihat respon sistem saat diberikan kesalahan pada detik ke 0,3. Dapat diketahui dari gambar yang diperbesar tersebut, respon sistem saat diberikan kesalahan bias 12% yang berarti sistem berkerja hanya 88%. Pada respon *slip ratio* yang belum adanya AFTC, saat detik ke-0,85 respon *slip ratio*

turun dan pada detik ke-0,87 sudah tidak stabil dan nilai *slip ratio* menyentuh hingga angka 0. Hal tersebut menunjukkan bahwa kendaraan tetap melaju dan tidak stabil hingga kendaraan berhenti karena menabrak. Dengan adanya AFTC detik ke-0,86 tetap *steady* pada *setpoint* 0,2 dan pada detik ke-0,865 respon *slip ratio* turun sampai dengan 0,16, kemudian pada detik ke-0,871 kendaraan sudah berhenti. Perbedaan dari kedua hal tersebut yaitu tanpa AFTC menyebabkan kemudi kendaraan masih tidak stabil dengan performansi sistem sebesar 88% saat adanya pengereman darurat, kemudian dengan adanya AFTC memiliki kelebihan yaitu kendaraan lebih stabil saat adanya pengereman darurat sampai kendaraan berhenti. Parameter performansi kesalahan bias 12% dapat ditunjukkan pada **Tabel 4.3**.



**Gambar 4.9** Grafik respon dari hasil uji kesalahan bias 12%

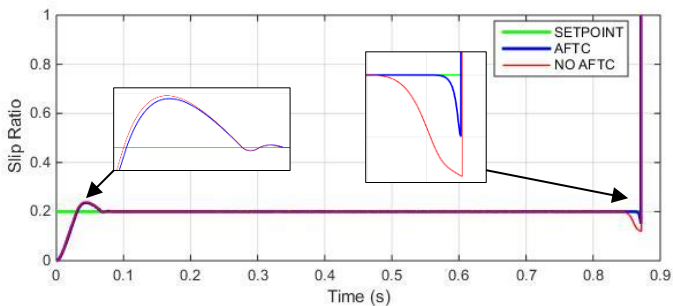
**Tabel 4.3** Parameter performansi kesalahan bias 12%

Parameter Performansi	SMC tanpa AFTC	SMC dengan AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	19,4 %	18,3 %
<i>Settling Time</i>	0,0808 s	0,0816 s
<i>Error Steady State</i>	0,9 %	0,9%

#### 4.4.3 Uji Kesalahan Bias 16%

Kesalahan bias 16% ditunjukkan pada grafik respon melalui **Gambar 4.10**. **Gambar 4.10** terlihat respon sistem saat diberikan

kesalahan pada detik ke 0,3. Dapat diketahui dari gambar yang diperbesar tersebut, respon sistem saat diberikan kesalahan bias 16% yang berarti sistem berkerja hanya 84%. Pada respon *slip ratio* yang belum adanya AFTC, saat detik ke-0,84 respon *slip ratio* turun sampai dengan 0,11. Berdasarkan penelitian (Guo, et al., 2014), *slip ratio* memiliki batas minimal dan maksimal yaitu minimalnya *slip ratio* adalah 0,15 dan maksimalnya 0,25. Sehingga dengan respon tanpa adanya AFTC tersebut dapat dinyatakan bahwa *slip ratio* sampai dengan 0,11 sudah tidak dapat ditoleransi. Dengan adanya AFTC detik ke-0,84 tetap *steady* pada *setpoint* 0,2 dan pada detik ke-0,86 respon *slip ratio* turun sampai dengan 0,15, kemudian pada detik ke-0,87 kendaraan sudah berhenti. Perbedaan dari kedua hal tersebut yaitu tanpa AFTC menyebabkan kemudi kendaraan masih tidak stabil dengan performansi sistem sebesar 84% saat adanya pengereman darurat, kemudian dengan adanya AFTC memiliki kelebihan yaitu kendaraan lebih stabil saat adanya pengereman darurat sampai kendaraan berhenti. Parameter performansi kesalahan bias 16% dapat ditunjukkan pada **Tabel 4.4**.



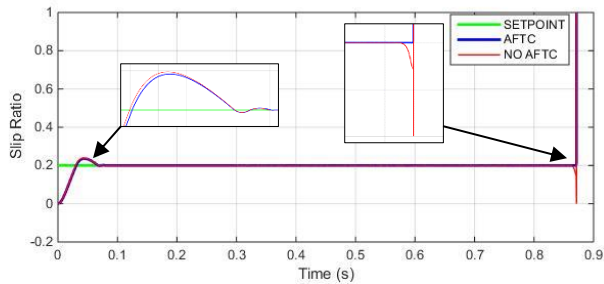
**Gambar 4.10** Grafik respon dari hasil uji kesalahan bias 16%

**Tabel 4.4** Parameter perfomansi kesalahan bias 16%

Parameter Perfomansi	SMC tanpa AFTC	SMC dengan AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	19,4 %	18,3 %
<i>Settling Time</i>	0,0808 s	0,0816 s
<i>Error Steady State</i>	0,9 %	0,9%



#### 4.4.4 Uji Kesalahan *Loss of Effectiveness* 6%



**Gambar 4.11** Grafik respon dari hasil uji kesalahan *loss of effectiveness* 6%

**Tabel 4.5** Parameter perfomansi kesalahan *loss of effectiveness* 6%

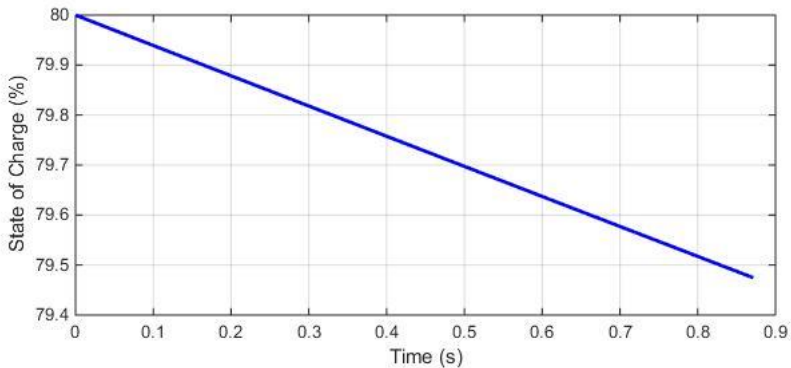
Parameter Perfomansi	SMC tanpa AFTC	SMC dengan AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	19,4 %	18,3 %
<i>Settling Time</i>	0,0808 s	0,0816 s
<i>Error Steady State</i>	0,9 %	0,9%

Kesalahan *loss of effectiveness* 6% ditunjukkan pada grafik respon melalui **Gambar 4.11**. **Gambar 4.11** terlihat respon sistem saat diberikan kesalahan pada detik ke 0,3. Dapat diketahui dari gambar yang diperbesar tersebut, respon sistem saat diberikan kesalahan *loss of effectiveness* 6% yang berarti sistem berkerja hanya 94%. Pada respon *slip ratio* yang belum adanya AFTC, saat detik ke-0,86 respon *slip ratio* turun hingga pada detik ke-0,87 sudah tidak stabil dan nilai *slip ratio* menyentuh angka 0. Hal tersebut menunjukkan bahwa kendaraan tetap melaju dan tidak stabil hingga kendaraan berhenti karena menabrak. Dengan adanya AFTC pada detik ke-0,87, respon dari *slip ratio* tetap *steady* pada *setpoint* 0,2. Perbedaan dari kedua hal tersebut yaitu tanpa AFTC menyebabkan kemudi kendaraan menjadi tidak stabil dengan performansi sistem sebesar 91% saat adanya pengereman darurat,

kemudian dengan adanya AFTC memiliki kelebihan yaitu kendaraan lebih stabil saat adanya pengereman darurat sampai kendaraan berhenti. Parameter perfomansi kesalahan *loss of effectiveness* 6% dapat ditunjukkan pada **Tabel 4.5**.

#### 4.6 Respon *State of Charge* pada Baterai

Penelitian ini memiliki kelebihan yaitu adanya *regenerative braking* pada ABS, sehingga saat adanya pengereman keras dan mendadak dapat menghasilkan listrik dari motor yang menjadi generator, sehingga listrik yang dihasilkan akan masuk sebagai pengisi baterai. Respon pada **Gambar 4.12** dari *state of charge* sebagai bukti bahwa pada sistem *regenerative* ABS ini dapat menghasilkan listrik yang akan masuk sebagai pengisi baterai.



**Gambar 4.12** Grafik respon dari *state of charge* pada baterai

Grafik respon pada **Gambar 4.12** menunjukkan bahwa pada saat terjadinya pengereman mendadak, nilai dari *state of charge* sebesar 80% dan saat mobil berhenti nilai dari *state of charge* sebesar 79,47%. Hal tersebut membuktikan bahwa *regenerative* ABS dapat menghasilkan listrik dari motor yang menjadi generator dengan adanya penambahan daya pada baterai sebesar 0,53%.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai perancangan sistem *Active Fault Tolerant Control* pada pengendalian torsi pengereman untuk *regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS) dengan kesalahan pada aktuator hidrolik adalah sebagai berikut:

- *Observer* yang dirancang sudah mampu merepresentasikan *plant* yang telah dimodelkan. Hal tersebut ditunjukkan dengan grafik respon dari *real plant* dan hasil estimasi dari *observer* untuk aktuator hidrolik sudah memiliki hasil yang sama.
- Perancangan sistem dengan AFTC dapat mengkompensasi kesalahan yang ada diaktuator hidrolik pada *regenerative ABS* dengan kesalahan bias sebesar 9%, 12%, 16% dan kesalahan *loss of effectiveness* sebesar 6% dengan parameter performansi dari *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state* tanpa AFTC berturut-turut sebesar 19,4%; 0,0808s; dan 0,9%. Sedangkan pada AFTC berturut-turut sebesar 18,3%; 0,081s; dan 0,9%. Pada kesalahan *loss of effectiveness* sebesar 6%, respon *slip ratio* menjadi 0 tanpa AFTC didetik ke-0,87, sedangkan adanya AFTC *slip ratio* tetap stabil didetik ke-0,87 hingga kendaraan berhenti.

#### **5.2 Saran**

Adapun terdapat beberapa saran dalam proses tugas akhir ini untuk digunakan pada penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- Pemodelan *regenerative ABS* dengan menggunakan pemodelan 4 roda dan menambahkan *fuzzy logic control* agar dapat merepresentasikan *real time plant*.
- Perancangan AFTC yang sudah ada agar dapat diimplementasikan ke *real plant* untuk membuktikan sistem AFTC pada *regenerative ABS* sudah dapat diaplikasikan.

- Gaya berat pada kendaraan agar ditinjau agar dapat memposisikan kendaraan saat adanya tanjakan atau turunan

## DAFTAR PUSTAKA

- Aly, A. A., Zeidan, E.-S., Hamed, A. & Salem, F., 2011. An Antilock-Braking System (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, pp. 186-195.
- Arigi, A. D., 2018. *Perancangan Active Fault Tolerant Control Pada Anti-Lock Braking System (ABS) Mobil Listrik dengan Kesalahan Pada Aktuator*. Surabaya, Jawa Timur: Repository ITS.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. & Staroswiecki, M., 2006. *Diagnosis and fault-tolerant control*. 2nd penyunt. New York, USA: Springer Verlag.
- C., E. P., A., A. F., Chidiebere, M. & Hope, E. I., 2018. Linear Slip Control for Improved Antilock Braking System. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, pp. 198-206.
- Chen, C. K. & Wang, Y. C., 1996. *Fuzzy Control for Anti-Lock Braking System*. Kenting, Taiwan, IEEE, pp. 67-72.
- Gadewar, S. V. & Jain, A. M., 2017. *Modelling and Simulation of Three Phase BLDC Motor for Electric Braking Using MATLAB/SIMULINK*. Pune, India, IEEE, pp. 14-19.
- Guo, J., Jian, X. & Lin, G., 2014. Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicle with a Fuzzy Sliding Mode Controller. *Energies*, pp. 6459-6476.
- Harifi, A., Aghagolzadeh, A., Alizadeh, G. & Sadeghi, M., 2005. *Designing a Sliding Mode Controller for Antilock Brake System*. Belgrade, Serbia & Montenegro, IEEE, pp. 258-261.
- Holkar, K. S. & Waghmare, L. M., 2013. Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance. *International Journal of Computer Application*, pp. 1-5.
- Indriawati, K., Agustinah, T. & Jazidie, A., 2013. *Reconfigurable Fault-Tolerant Control of Linear System with Actuator and Sensor Faults*. Penang, Malaysia, IEEE, pp. 22-27.
- Indriawati, K., Agustinah, T. & Jazidie, A., 2016. Robust Fuzzy Observer-Based Fault Tolerant Tracking Control for

- Nonlinear Systems with Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to a DC Series Motor Speed Drive. *Praise Worthy Prize*, pp. 375-385.
- Jiang, J., 2005. Fault-tolerant Control Systems - An Introductory Overview. *Acta Automatica Sinica*, 31(1), pp. 161-174.
- Johansen, T. A., Petersen, I., Kalkkuhl, J. & Ludemann, J., 2003. Gain-Scheduled Wheel Slip Control in Automotive Brake Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pp. 799-811.
- Liu, J. & Wang, X., 2012. *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Lunze, J. & H, R. J., 2008. Reconfigurable Fault-tolerant Control: A Tutorial Introduction. *European Journal of Control*, Volume 5, pp. 359-386.
- Motors, M., 2015. *Anti-Lock Brake System*. [Online] Available at: <https://www.mitsubishi-motors.ro/tehnologie/abs/#!>
- Nasir, A. N. K., Ismail, R. M. T. R. & Ahmad, M. A., 2010. Performance Comparison between Sliding Mode Control (SMC) and PD-PID Controllers for a Nonlinear Inverted Pendulum System. *International Journal of Computer, Electricalm Automation, Control and Information Engineering*, pp. 1-6.
- Noura, H., Theiliol, D., Ponsart, J. C. & Chamseddine, A., 2009. *Fault-tolerant Control Systems: Design and Practical Applications*. London: Springer-Verlag.
- Ogata, K., 2010. *Modern Control Enginnering: Fifth Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Patton, R. J., 1997. *Fault tolerant control: the 1997 situation*. Hull, United Kingdom, IFAC.
- Peng, D., Zhang, Y., Yin, C. L. & Zhang, J. W., 2008. Combined Control of a Regenerative Braking and Antilock Braking System for Hybrid Electric Vehicles. *International Journal Automotive Technology*, pp. 749-757.
- Petersen, I., Johansen, T. A., Kalkkuhl, J. & Ludemann, J., 2003. *Wheel Slip Control Using Gain-Scheduled LQ-LPV/LMI*

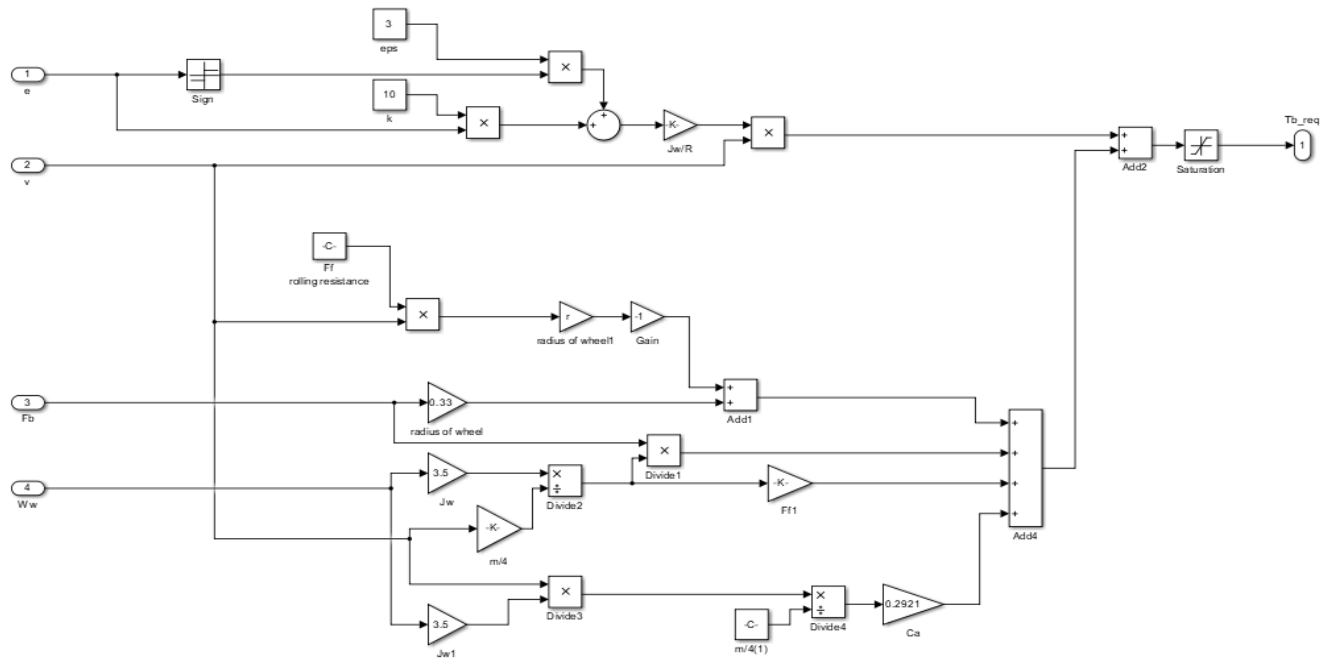
- Analysis and Experimental Results*. Cambridge, UK, European Control Community, pp. 880-885.
- Rahmani, M., Ghanbari, A. & Etefagh, M. M., 2016. Robust Adaptive Control of a Bioinspired Robot Manipulator Using Bat Algorithm. *Expert Systems with Applications* 56, pp. 164-176.
- Slotine, J.-J. E. & Li, W., 1991. *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice Hall.
- Smart, J., 2016. *Idaho National Laboratory*. [Online] Available at: <https://at.inl.gov> [Diakses 15 January 2018].
- Solyom, S. & Rantzer, A., 2002. *Synthesis of a Model-Based Tire Slip Controller*. Lund, Sweden: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology.
- Stanislaw, H. Z. & Yonggon, L., 2002. *Designing a Genetic Neural Fuzzy Antilock-Brake-System Controller*. s.l., IEEE, pp. 198-211.
- Staroswiecki, M. & Gehin, A., 2001. From control to supervision. *Annual Reviews in Control*, 25(1), pp. 1-11.
- Tur, O., Ustun, O. & Tuncay, R. N., 2007. *An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-lock Braking System*. Istanbul, Turkey, IEEE, p. 944–948.
- Wabco, M., 1999. *Anti-Lock Braking System Training Program: Student Manual*. Troy, MI USA: Meritor WABCO Vehicle Control System.
- Yanan, G., 2016. Research on Electric Vehicle Regenerative Braking System and Energy Recovery. *International Journal of Hybrid Information Technology*, pp. 81-90.
- Yi, L., Zhang, C. & Wang, G., 2017. Research of Self-Tuning PID for PMSM Vector Control based on Improved KMTOA. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, pp. 60-67.
- Zhang, Y. & Jiang, J., 2008. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, Volume 32, p. 229–252.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



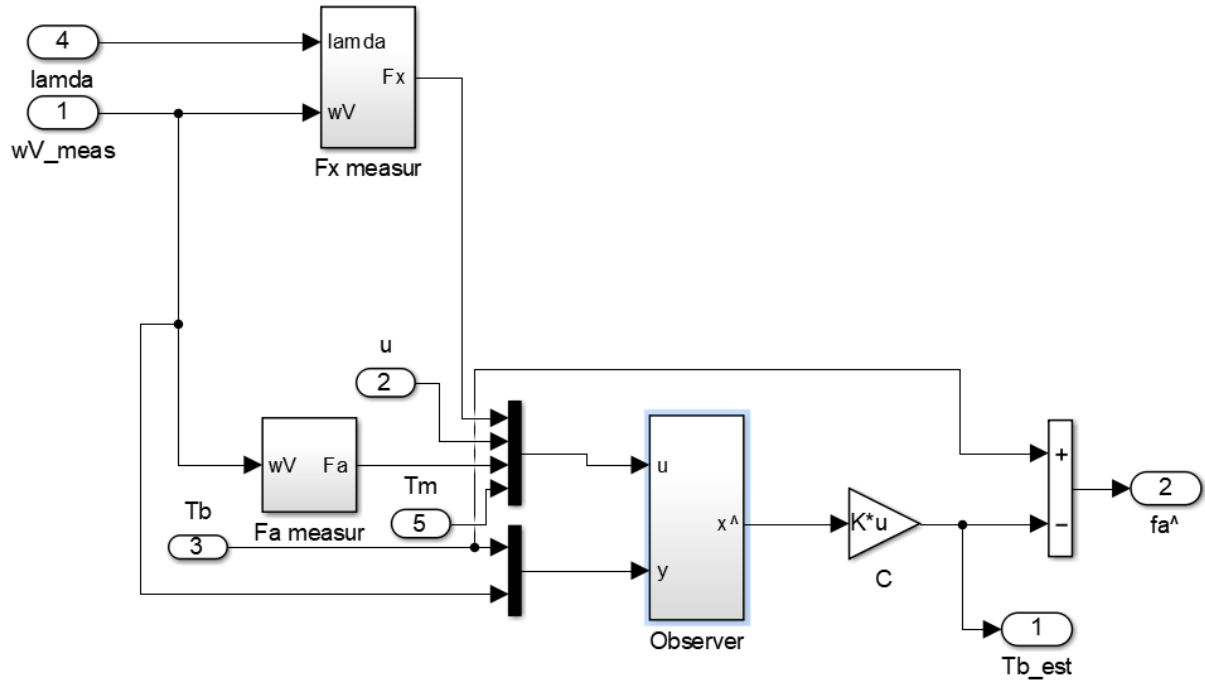


*Halaman ini sengaja dikosongkan*

SIMULINK MATLAB R2013a *SLIDING MODE CONTROLLER (SMC)*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# SIMULINK MATLAB R2013a *OBSERVER REGENERATIVE ABS*



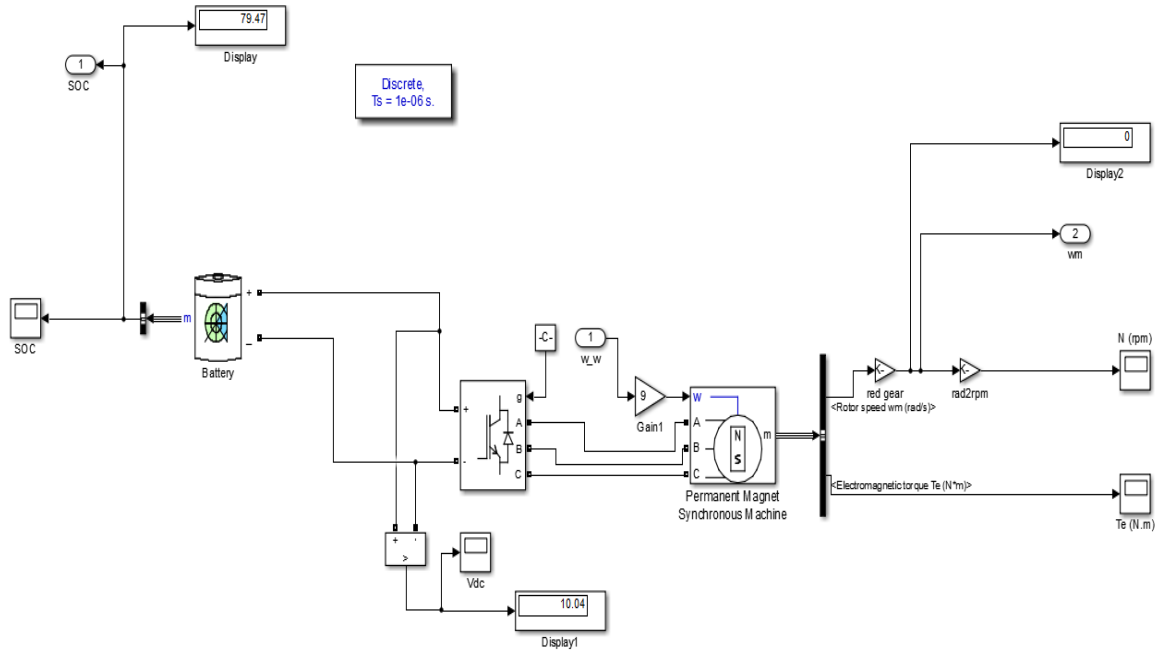
*Halaman ini sengaja dikosongkan*



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

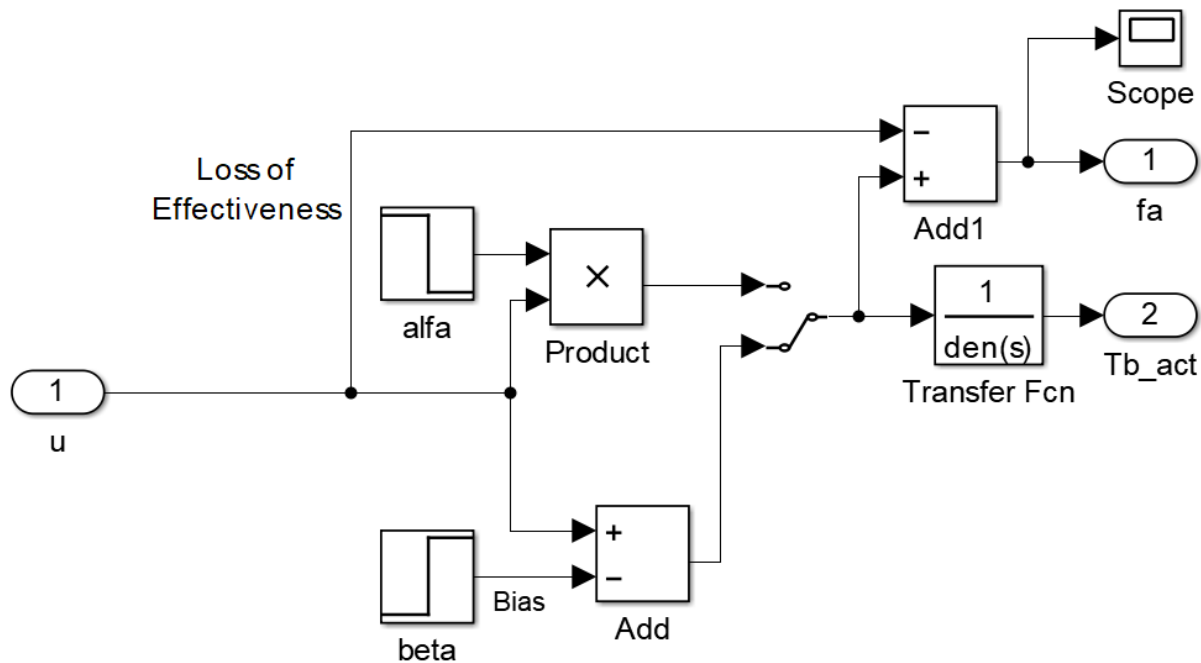


## SIMULINK MATLAB R2013a *MOTOR PLAN REGENERATIVE ABS*



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

SIMULINK MATLAB R2013a *FAULT* AKTUATOR *REGENERATIVE* ABS



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LISTING PROGRAM MATLAB R2013a m.file**  
***REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM***

```
clc;
clear;

% Definisi parameter sistem
m=342.5;
r=0.33;
j=3.5;
g=9.8;
c1=1.029;
c2=17.16;
c3=0.523;
c4=0.03;

% Observer
A=[-100 0; 0 -0.098] %Matriks A
B=[0 100 0 100; -0.0116 0 -0.0116 0] %Matriks B
C=[1 0; 0 1] %Matriks C
n = length(A)
p = size(C,1)
mu = size(B,2)
Fa=[100;0];
Fs=[0;0];
fs = size(Fs,2);
fa = size(Fa,2);
Abar = 1*eye(p);
Aa = [A zeros(n,p); Abar*C -Abar]
Ba = [B;zeros(p,mu)]
Ca = [zeros(p,n) eye(p)]
Ea = [Fa zeros(n,fs); zeros(p,fa) Abar*Fs]
Atild = [Aa Ea; zeros(fa+fs,n+p) zeros(fa+fs)];
Ctild = [Ca zeros(p,fa+fs)];
rank(Atild);
rank(observ(Atild,Ctild));

p1= -100.0023 + 0.0000i;
p2= -0.5498 + 0.8116i;
```

```
p3= -0.5498 - 0.8116i;  
p4= -0.3259 + 1.0274i;  
p5= -0.3259 - 1.0274i;  
p6= -0.0000 + 0.0000i;
```

```
Ktild = place(Atild',Ctild',[p1 p2 p3 p4 p5  
p6]);%observer sistem  
K = Ktild(:,1:n+p)%estimasi state  
L = Ktild(:,n+p+1:n+p+fa+fs)%estimasi kesalahan
```

## BIODATA PENULIS



Nama penulis Senko Diarnise dilahirkan di Jakarta, tanggal 05 Desember 1995. Saat ini penulis tinggal di Jakarta. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDS Barunawati IV Jakarta pada tahun 2008, pendidikan di SMPN 95 Jakarta pada tahun 2011, pendidikan di SMAN 13 Jakarta pada tahun 2014. Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS pada tahun 2014. Semasa perkuliahan, penulis aktif organisasi kemahasiswaan di Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika ITS (HMTF ITS), Forum Komunikasi Mahasiswa Teknik Fisika se-Indonesia (FKMTF). Penulis juga aktif organisasi lembaga minat bakat di UKM IBC (ITS Badminton Community) dan juga ikut berpartisipasi di Tim ITS Formula Electric untuk lomba Student Formula Japan 2018. Pada bulan Juli 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Perancangan Sistem Active Fault Tolerant Control Pada Regenerative Anti-Lock Braking System Mobil Listrik Dengan Kesalahan Pada Akuator**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui email: [diarnise@gmail.com](mailto:diarnise@gmail.com)